мышление в науке и искусстве. Москва : Прогресс-Традиция, 2002. С.109–125.

9. Кузьменко О.С. Теоретичні і методичні засади навчання фізики студентів технічних закладів вищої освіти в контексті розвитку STEM-освіти: монографія. Кропивницький : видавництво КОД, 2018. 624 с.

10. Кузьменко О.С. STEM-моделювання фізичних явищ у процесі навчання студентів професійно-технічним дисциплінам в закладах вищої освіти. *Наукові записки. Серія : Педагогічні науки*. Кропивницький : РВВ ЦДПУ ім. В. Винниченка, 2018. Вип. 168. С. 120–124.

11. Маркова О.Ю. Междисциплинарность как методологический принцип философии образования. *Образование и гражданское общество : материалы круглого стола, 15 ноября 2002 г.* Вып. 1 СПб.: Санкт-Петербургское философское общество, 2002. С. 24–27.

12. Lewowicki Tadeusz. Interdyscyplinarnjść pedagogiki – tradycja i wspotczeność, problemy i szanse. *Interdyscyplinarnosc pedagogiki i jej subdyscypliny*. V польсько-український форум. Краків, Польща. 2002. С.17–31.

REFERENCES

1. Akoff, R., Emeri, F. (1974) *O tseleustremlennyih sistemah* [On purposeful systems:]. Moscow.

2. Arhangelskiy, S.I. (1976) *Lektsii po nauchnoy organizatsii uchebnogo protsessa vyisshey shkole*. [Lectures on the scientific organization of the educational process in higher education]. Moscow.

3. Vasilkova, V.V. (2004) *Mezhdistsiplinarnost kak kognitivnaya praktika (na primere stanovleniya kommunikativnoy teorii)* [Interdisciplinarity as a cognitive practice (on the example of the formation of communication theory)]. Saint Petersburg.

4. Dudchenko, V.S. (1996) *Osnovyi innovatsionnoy metodologi*. [Fundamentals of innovative methodology]. Moscow.

5. Dyurkgeym, E. (1996) *Metod sotsiologii: per. s fr. Zapadno-evropeyskaya sotsiologiya XIX – nachala XIX vekov.* [Method of Sociology: per. with fr. Western European sociology of the 19th - early 20th centuries]. Moscow.

6. Krymskyi, S.B. (2003) *Proekt i proektuvannia v suchasnii tsyvilizatsii.* [Design and engineering in modern civilization]. Kyiv.

7. Kropotova, N.V. (2008) *Unyversytet kak prostranstvo mezhdstsyplynarnoi kommunykatsyy* [University as a space of interdisciplinary communication]. Kharkiv.

8. Kurdyumov, S.P., Knyazeva, E.N. (2002) *Strukturyi buduschego: sinergetika kak metodologicheskaya osnova futurologii* [Structures of the future: synergetics as a methodological basis for futurology]. Moscow.

9. Kuzmenko, O.S. (2018) *Teoretichni i metodichni zasadi navchannya fIziki studentIv tehnIchnih zakladiv vischoyi osviti v konteksti rozvitku STEM-osviti* [Theoretical and methodological principles of teaching physics to students of technical institutions of higher education in the context of the development of STEM education]. Kropyvnytskyi.

10. Kuzmenko, O.S. (2018) *STEM-modeliuvannia fizychnykh yavyshch u protsesi navchannia studentiv profesiino-tekhnichnym dystsyplinam v zakladakh vyshchoi osvity* [STEM-modelling of physical phenomena in the process of teaching students professional and technical disciplines in higher education institutions]. Kropyvnytskyi.

11. Markova, O.Yu. (2002) *Mezhdistsiplinarnost kak metodologicheskiy printsip filosofii obrazovaniya* [Interdisciplinarity as a methodological principle of the philosophy of education]. Saint Petersburg.

12. Lewowicki, Tadeusz. (2002) *Interdyscyplinarnjść pedagogiki – tradycja i wspotczeność, problemy i szanse* [The interdisciplinarity of pedagogy - tradition and timelessness, problems and opportunities]. Poland.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

КУЗЬМЕНКО Ольга Степанівна – доктор педагогічних наук, доцент, професор кафедри фізико-математичних дисциплін Льотної академії Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси: методика навчання фізики в закладах освіти, STEM-освіта, цифрова адженда.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

KUZMENKO Olha Stepanovna – Doctor of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Physical and Mathematical Disciplines of the Flight Academy of the National Aviation University.

***Circle of research interests*:** methods of teaching physics in educational institutions, STEM education, digital agenda.

Стаття надійшла до редакції 26.09.2021 р.

УДК [51+52+53]–
DOI: 10.36550/2415-7988-2021-1-201-20-24

КУЗЬМЕНКОВ Сергій Георгійович –
доктор педагогічних наук, кандидат фізико-математичних наук,
професор, завідувач кафедри фізики
Херсонського державного університету
ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5257-9523
e-mail: ksg3.14159@gmail.com

ЧИ ІСНУЮТЬ ФУНДАМЕНТАЛЬНІ МАТЕМАТИЧНІ КОНСТАНТИ? ПРИЧИНИ ЇХ ПОЯВИ У ФІЗИЧНИХ ТА АСТРОНОМІЧНИХ ФОРМУЛАХ

Постановка та обґрунтування актуальності проблеми. Нещодавно нами була надрукована стаття «Які фізичні константи можна вважати фундаментальними?» [8]. Як з'ясувалось, 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. Ми запропонували 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: швидкість світла у вакуумі c, гравітаційну сталу G, сталу Планка ħ, заряд електрона e, масу протона m_p, масу нейтрона m_n і масу електрона m_e, сталу Габбла H_0, розмірність простору. Уявні варіації числових значень саме цих констант кардинально змінюють наш Всесвіт [8].

Однак для повної характеристики спостережуваного Всесвіту цей список, на нашу думку, слід доповнити двома математичними константами.

Взагалі у математиці термін «константа» має кілька значень. У загальному випадку – це деяка стала величина, на відміну від змінних величин (наприклад, числові коефіцієнти у рівняннях та їх розв’язках). У вузькому сенсі – це стала величина, що має певне конкретне значення (наприклад, числа Бернуллі, стала Ейлера γ та інші – математичних констант такого роду відомо багато, див, зокрема, [4]).

Проте є математичні константи, які мають особливе значення: це числа π та e. Спробуємо розібратись, по-перше, чи можна їх віднести до класу фундаментальних.

По-друге, як відомо, числа π і e присутні в багатьох фізичних і астрономічних формулах. У чому полягають причини такої частої появи цих констант у фізиці й астрономії? Студенти й учні часто не усвідомлюють, а, отже, не можуть пояснити їх появу у відомих формулах. Яскравим прикладом є наявність числа π у формулі для періоду коливань математичного маятника: $T = 2\pi\sqrt{l/g}$.

Отже, з’ясування статусу констант π та e надзвичайно важливо, оскільки, на нашу думку, саме набір фундаментальних констант однозначно представляє наш Всесвіт. А з’ясування причин появи цих констант у фізичних і астрономічних формулах, важливо з методологічного і методичного поглядів, а, відтак, теж є актуальним. Ці з’ясування і є **метою** даної статті.

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.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кілька авторів досліджували роль констант π та e, зокрема Б.С. Горобець [5] і О.В. Жуков [6].

Добре відомо, що число π дорівнює відношенню довжини кола до його діаметру. Як зазначає Б.С. Горобець [5], особлива ж «роль кола у просторі нашого Всесвіту випливає з однаковості властивостей порожнього евклідового простору за будь-яким напрямком, тобто ізотропності простору».

Число π присутнє не лише у фізичних або астрономічних формулах, а з’являється в розв’язках деяких задач з теорії ймовірностей. Наприклад, поява π в нормальному (гауссовому) законі розподілу випадкової величини. Наочною ілюстрацією, що пояснює цю появу, на думку Б.С. Горобця [5], є приклад зі стрільбою по мішені (за незмінних умов). Місця влучання на мішені розсіяні по колу, оскільки стрільба відбувається у сферично-симетричному просторі, в якому рівноймовірні випадкові відхилення у будь-якому напрямку.

О.В. Жуков присвятив числу π чудову книжку [6]. В ній згадуються неевклідові геометрії, в яких відношення довжини кола до свого діаметру може відрізнятися від відомого нам π, а також закон збереження числа π. Суть цього закону полягає в тому, що π, будучи вилученим з однієї формули, безповоротно з’являється в іншій. Наприклад, якщо в міжнародній системі одиниць СІ ми напишемо закон Кулона без множника 1/4π ($F = q_1q_2/\varepsilon_0 r^2$), то, скажімо. ємність плаского конденсатора буде визначатися не формулою $\varepsilon\varepsilon_0 S/d$, а формулою $\varepsilon\varepsilon_0 S/4\pi d$. а об’ємна густина електричного поля визначалась би не формулою $\varepsilon\varepsilon_0 E^2/2$, а формулою $\varepsilon\varepsilon_0 E^2/8\pi$, і т. д.

Інша константа – число e, що є основою експоненціальної функції (експоненти), «відображає ще й еволюцію живої природи у Всесвіті» [5] (точніше, закони розвитку і діяльності організмів відомого нам життя). Насправді (і про це пише сам Б.С. Горобець), експонента «грає» величезну роль і в еволюції неживої матерії (розпад радіоактивних елементів, зношення матеріалів, хвильові процеси і т. д.). Нагадаємо також, що експонента e^x є єдиною функцією, похідна якої збігається з самою функцією.

Однією з причин появи експоненти у фізичних формулах Горобець називає однорідність простору–часу. «Число e як основа функції комплексної змінної пов’язано із законом збереження енергії в замкненій системі, який зумовлений однорідністю часу, і з законом збереження імпульса, що зумовлений однорідністю простору [5].

Лінійні процеси – продовжує Горобець – «зберігають свою лінійність саме завдяки однорідності простору й часу. Математично лінійний процес описується функцією, яка є розв’язком диференціального рівняння зі сталими коефіцієнтами». Ядро такої функції – функція комплексної змінної з основою e (рівняння хвилі) [5].

Другою причиною поширеності експоненти, на думку Горобця, є існування фундаментального принципу: «приріст (зміна – вставка наша) величини пропорційний самій величини» [5]. Це характерно для багатьох процесів у найрізноманітніших сферах неживої та живої природи: зростання сніжного кому, молюску, фінансової піраміди, зменшення пам’яті з часом, збільшення кількості бактерій в організмі і т. і.

Третя причина – існування універсального психофізичного закону Вебера–Фехнера. Цей закон можна сформулювати так: зміна будь-якого відчуття прямо пропорційна відносній зміні подразнювального чинника. Експоненціальний (за прямою функцією) і логарифмічний (за оберненою функцією) закони приросту величин оптимальні для розвитку багатьох організмів. Їх дійсно можна наочно прослідкувати за утворенням логарифмічних спіралей у раковинах молюсків, рядках насіння у соняшнику, лусочок у шишках [5]. При цьому Горобець упускає важливий приклад із неживої природи – візерунок рукавів у спіральних галактиках, який добре описується саме логарифмічними спіралями.

Однак, на нашу думку, не всі причини такої поширеності е Горобцем виявлено.

Виклад основного матеріалу дослідження. Так, наявність у формулах числа π зумовлена симетричними властивостями простору (його ізотропністю) [5; 6].

Наприклад, у відомій задачі Бюффона (1777 р.), про кидання голки на розграфлений паралельними прямими лініями папір. У задачі потрібно знайти ймовірність того, що голка перетне одну з прямих. Результат розв'язання, на перший погляд, виглядає дещо несподівано: $p = 2l/\pi L$, де l – довжина голки, а L – відстань між паралельними прямими [7]. Насправді ця задача принципово нічим не відрізняється від задачі про стрільбу по мішені, де випадкові відхилення влучень від центру мішені підкоряються нормальному (гауссовому) закону, в якому фігурує число π.

Або, наприклад, задача про свічку між дзеркалами (рис. 1).

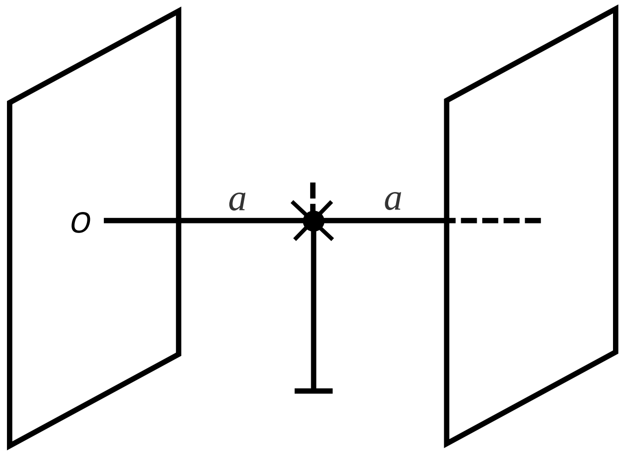

Рис. 1. Свічка розташована посередині між паралельними дзеркалами на відстані а від кожного з них

Припускаючи, що сила світла свічки дорівнює I, знайдемо освітленість у точці O, яка є основою перпендикуляра, опущеного з вогника свічки на площину дзеркала [6].

Через багатократне відбивання у двох дзеркалах освітленість E у точці O дорівнює:

$$E = \frac{I}{a^2} + \frac{I}{(3a)^2} + \frac{I}{(5a)^2} + \frac{I}{(7a)^2} + \ldots = \frac{I}{a^2}\left(1 + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{5^2} + \frac{1}{7^2} + \ldots\right) = \frac{\pi^2 I}{8a^2}. (1)$$

Тут використано один із рядів Ейлера, який визначає суму обернених квадратів непарних чисел через число π [6].

Але тут ми також маємо просторову симетрію у відбиваннях променів у сферично-симетричному просторі.

З іншого боку, числове значення π, тобто значення відношення довжини кола до свого діаметра у світах, що описуються геометріями Евкліда, Лобачевського або Рімана (що відповідає різним сценаріям розширення спостережуваного Всесвіту), буде різним [2; 10].

Елемент довжини у просторі з додатною сталою кривизною a (геометрія Рімана або сферична) у сферичних координатах має вигляд [10, с. 456]:

$$dl^2 = \frac{dr^2}{1-\frac{r^2}{a^2}} + r^2(\sin^2\theta\, d\phi^2 + d\theta^2). (2)$$

Довжина кола в цих координатах дорівнює $2\pi r$, а площа поверхні сфери – $4\pi r^2$. Довжина ж «радіусу» кола (або сфери) дорівнює

$$\int_0^r \frac{dr}{\sqrt{1-\frac{r^2}{a^2}}} = a \arcsin\frac{r}{a}, (3)$$

тобто більше r (з підінтегрального виразу і області визначення функції арксинус слідує, що має бути a > r). Отже, відношення довжини кола до діаметру в такому просторі менше за π.

Елемент довжини у просторі сталої від'ємної кривизни (геометрія Лобачевського) у координатах r, θ, φ має вигляд [10, с. 458]:

$$dl^2 = \frac{dr^2}{1+\frac{r^2}{a^2}} + r^2(\sin^2\theta\, d\phi^2 + d\theta^2), (4)$$

де координата r може мати будь-яке значення в діапазоні від 0 до ∞. Відношення довжини кола до діаметру у цьому випадку більше за π.

Зазначимо, що геометрія Рімана (або сферична) може описувати замкнений Всесвіт, в якому його розширення зупиняється і змінюється на стискання, а геометрія Лобачевського – відкритий Всесвіт, в якому розширення буде вічним.

Нещодавно було з'ясовано [2], що наш Всесвіт описується евклідовою геометрією. Отже, відоме нам число π має таке значення саме за такої геометрії і тому це число може слугувати фундаментальною характеристикою нашого Всесвіту.

Що стосується іншої константи – числа e, то наочною ілюстрацією першої причини (за Горобцем) появи цієї константи у фізичних формулах є, наприклад, квантомеханічна задача про рух мікрочастинки у потенціальній ямі. Цей рух всередині одновимірної потенціальної ями описується стаціонарним рівнянням Шрьодінгера:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + k^2\psi = 0, (5)$$

де $k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$, m – маса частинки, E – її енергія, ħ – стала Планка. Оскільки це лінійне диференціальне рівняння зі сталими коефіцієнтами, то його загальний розв'язок має вигляд:

$$\psi(x) = C_1 e^{ikx} + C_2 e^{-ikx}, (6)$$

Константи C_1 і C_2 знаходять, зазвичай, використовуючи умови на межах тієї області, де рухається частинка.

Ілюстрацією другої причини є, наприклад, виведення закону радіоактивного розпаду. Виходячи з очевидного припущення, що зміна кількості радіоактивних ядер з часом прямо пропорційна кількості самих ядер:

$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$, (7)

де λ – стала розпаду.

Розділяючи в цьому рівнянні змінні, інтегруємо. Тоді матимемо

$\ln N = -\lambda t + C$, (8)

де C – стала інтегрування. Покладаючи в початковий момент часу t = 0 кількість ядер $N = N_0$, остаточно дістаємо

$N = N_0 e^{-\lambda t}$. (10)

Третю причину можна проілюструвати виведенням формули Погсона, яка пов'язує зоряні величини m_1 і m_2 двох зір і освітленості E_1 та E_2, які створюють ці зорі на Землі відповідно.

Очевидно, що освітленість E – подразнювальний чинник, а зоряна величина m – відчуття (сприйняття) освітленості, причому за традицією, що походить від Гіппарха, їхні зміни dE і dm протилежні за знаком, оскільки із зростанням освітленості E зоряна величина m зменшується. Тоді згідно з законом Вебера–Фехнера [2]:

$dm = -k\frac{dE}{E} \quad \Rightarrow \quad m = -k\ln E + C$, (11)

де k — коефіцієнт пропорційності, C — стала інтегрування. Для двох світил з величинами освітленості від них E_1 і E_2 різниця відповідних зоряних величин дорівнює

$m_2 - m_1 = -k\ln\frac{E_2}{E_1}$. (12)

Переходячи до десяткових логарифмів і враховуючи пропозицію Погсона (що інтервалові в 5 зоряних величин відповідає відношення величин освітленості, яке дорівнює 100), отримуємо шукану формулу:

$m_2 - m_1 = -2{,}5\lg\frac{E_2}{E_1}$. (13)

Звертаємо увагу на те, що натуральний логарифм є функцією оберненою експоненті, тобто експонента (і/або натуральний логарифм) з'являються там, де діє закон Вебера–Фехнера.

Проте ми вважаємо, що до цих трьох причин появи числа e у фізичних формулах слід додати четверту причину – появу e через другу чудову границю.

Як знаємо, у статистичній фізиці величезне значення має розподіл Гіббса, який має вигляд [9]:

$w_n = Ae^{-\frac{E_n}{kT}}$, (14)

де w_n – ймовірність такого стану усієї системи, за якого дане тіло (як мала частина великої системи) або підсистема перебуває в деякому визначеному стані з енергією E_n, k – стала Больцмана, T – температура системи (температура тіла і системи однакова, оскільки система перебуває в рівновазі), A – сталий множник. Виявляється, що цей розподіл можна отримати за допомогою другої чудової границі.

Можна показати, що ймовірність перебування тіла (підсистеми) у стані з енергією E_n у системі з енергією E визначається виразом [11]:

$$w_n = B(E - E_n)^\nu = BE^\nu\left(1 - \frac{E_n}{E}\right)^\nu =$$

$$= BE^\nu\left[\left(1 - \frac{E_n}{E}\right)^{\frac{E}{E_n}}\right]^{\frac{E_n}{E}\nu}. \quad (15)$$

Тут E енергія всієї системи і $E_n << E$, показник степеню ν визначається кількістю підсистем, а B – деяка стала. Якщо система – ідеальний газ, то $\nu \sim N$, де N – кількість частинок, атомів або молекул. Позначаючи $E/E_n = \alpha$, вираз у квадратних дужках можна представити як другу чудову границю:

$\lim_{\alpha\to\infty}\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)^\alpha = e^{-1}$. (16)

Енергія системи передбачається величиною сталою (для ідеального газу $E = 3NkT/2$), система перебуває у термодинамічній рівновазі і характеризується таким макропараметром як температура T. Тоді остаточно матимемо вираз (14).

Заради справедливості слід зауважити, що розподіл Гіббса можна отримати і через нормальний розподіл (див., наприклад, [3, с. 45]).

Слід також зазначити, що за допомогою другої чудової границі можна отримати й інші формули: наприклад, розрахувати ймовірність зіткнення частинок в газі або ймовірність розпаду радіоактивного атомного ядра (як альтернативний спосіб отримання закону радіоактивного розпаду – див., наприклад, [1, с. 43, с. 83]).

Висновки з дослідження і перспективи подальших розробок. У результаті проведеного дослідження можна зробити такі висновки:

1. Числа π і e є особливими математичними константами, які надто поширені у фізиці й астрономії.

2. Причини появи цих констант у фізичних і астрономічних формулах різні, оскільки ці константи мають різне походження: π виникає як відношення довжини кола до свого діаметру, а e – як границя певної нескінченної послідовності.

3. Наявність у формулах числа π зумовлена симетричними властивостями простору, а саме його ізотропністю. І це ірраціональне число дійсно можна вважати фундаментальною константою, оскільки воно характеризує саме наш Всесвіт, який описується евклідовою геометрією. В інших всесвітах, які описуються неевклідовими геометріями, це число буде іншим.

4. До відомих трьох причин появи числа Ейлера, а саме: 1) як результат інтегрування лінійних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами (це зумовлено симетричними властивостями простору-часу, а саме їх однорідністю); 2) як результат інтегрування диференціальних рівнянь, в яких зміна якоїсь величини пропорційна самій

величині; 3) як наслідок застосування універсального психофізичного закону Вебера-Фехнера; ми вважаємо, що слід додати четверту причину – появу через другу чудову границю. Все це проілюстровано в даній статті.

5. Щодо фундаментальності числа е як константи, то тут виникає проблема. Його значення не можна варіювати, як ми це пропонували для фізичних констант для з'ясування їх статусу, оскільки границя нескінченої послідовності $\lim_{x\to\infty}\left(1+\frac{1}{x}\right)^x = e$ завжди. Адже як х може виступати не тільки будь-яка змінна, а й складна функція за умови прямування її до ∞. Отже, не тільки в нашому Всесвіті, а й в інших, ця границя буде дорівнювати числу е. Тому цю константу формально не можна вважати фундаментальною в межах прийнятого нами критерію. Проте її можна вважати суперконстантою – універсальною для можливих всесвітів можливо, «мультиверсною».

У подальшому, потрібно уточнити склад повної групи фундаментальних констант – як фізичних, так і математичних, які однозначно представляють наш Всесвіт.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Агекян Т.А. Теория вероятностей для астрономов и физиков. М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1974. 264 с.
2. Андрієвський С.М., Кузьменков С.Г., Захожай В.А., Климишин І.А. Загальна астрономія: підручник. Харків: ПромАрт., 2019. 524 с.
3. Ансельм А.И. Основы статистической физики и термодинамики: учебное пособие. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1973. 424 с.
4. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. 720 с.
5. Горобец Б.С. Мировые константы π и е в Природе. *Земля и Вселенная*. 2003. № 5. С. 69–76.
6. Жуков А.В. Вездесущее число π. М.: Издательство ЛКИ, 2007. 216 с.
7. Кузьменков С.Г. Фундаментальні фізичні та математичні константи: Задачі з розв'язаннями: навч. посібник. Херсон, 2021. 96 с.
8. Кузьменков С.Г. Які фізичні константи можна вважати фундаментальними? *Наукові записки. Випуск 198. Серія: Педагогічні науки*. Кропивницький: РВВ ЦДПУ ім. В. Винниченка, 2021. С. 40–44.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Часть 1 («Теоретическая физика», т. V). М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1976. 584 с.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля («Теоретическая физика», т. II). М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1976. 584 с.
11. Школа О.В. Основи термодинаміки і статистичної фізики: [навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів]. Донецьк: Юго-Восток, 2009. 375 с.

REFERENCES

1. Ahekian, T.A. (1974) *Teorija verojatnostej dlja astronomov i fizikov*. [Probability theory for astronomers and physicists]. Moskva.
2. Andriievskyi, S.M., Kuzmenkov, S.H., Zakhozhai, V.A., Klymyshyn, I.A. (2019) *Zahalna astronomiia* [General astronomy]. Kharkiv.
3. Anselm, A.Y. (1973) *Osnovy statisticheskoj fiziki i termodinamiki*. [Fundamentals of statistical physics and thermodynamics]. Moskva.
4. Bronshtein, Y.N., Semendiaev, K.A. (1981) *Spravochnik po matematike dlja inzhenerov i uchashhihsja vtuzov*. [Handbook of mathematics for engineers and university students]. Moskva.
5. Horobets, B.S. (2003) *Mirovye konstanty π i e v Prirode*. [World constants π and e in Nature].
6. Zhukov, A.V. (2007) Vezdesushhee chislo π. [The ubiquitous number π] Moskva.
7. Kuzmenkov, S.H. (2021) *Fundamentalni fizychni ta matematychni konstanty: Zadachi z rozviazanniamy: navch. posibnyk*. [Fundamental physical and mathematical constants: Problems with solutions: textbook. manual]. Kherson.
8. Kuzmenkov, S.H. (2021) *Yaki fizychni konstanty mozhna vvazhaty fundamentalnymy?* [What physical constants can be considered fundamental?]. Kropyvnytskyi.
9. Landau, L.D., Lyfshyts, E.M. (1976) *Statisticheskaja fizika. Chast' 1 («Teoreticheskaja fizika», t. V)*. [Statistical physics. Part 1 («Theoretical Physics», vol. V)]. Moskva.
10. Landau, L.D., Lyfshyts, E.M. (1976) *Teoryia polia («Teoretycheskaia fyzyka», t. II)*. [Field theory («Theoretical Physics», vol. II)]. Moskva.
11. Shkola, O.V. (2009) *Osnovy termodynamiky i statystychnoi fizyky* [Fundamentals of thermodynamics and statistical physics]. Donetsk.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

КУЗЬМЕНКОВ Сергій Георгійович – доктор педагогічних наук, кандидат фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри фізики Херсонського державного університету.

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

KUZMENKOV Serhii Heorhiyovych – Doctor of Pedagogical Sciences, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Physics Kherson State University.

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

Стаття надійшла до редакції 26.10.2021 р.