

Садовий Микола

Центральноукраїнський державний педагогічний університет імені

Володимира Винниченка

СПІВВІДНОШЕННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ У НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ: ІСТОРИЧНИЙ АСПЕКТ

Анотація. У статті розглядається проблема невизначеності фізичних величин у ході проведення досліджень. Дається загальний підхід визначення поняття невизначеності, роль флуктуацій у їх виникненні. Розкривається еволюція ідей Л. де Бройля в частині ролі хвиль де Бройля та висунення поняття невизначеності координат та імпульсу Гейзенбергом, використання цього поняття в описі мікросвіту Шредінгером. Робиться висновок, що у квантовій фізиці, чим точніше дослідно визначається одна фізична величина, тим менш визначена друга, і ніякий експеримент не може привести до одночасного точного вимірювання обох динамічних величин. Це є об'єктивна властивість матерії. Л.С. Мандельштам та І.Є. Тамм вперше ввели поняття невизначеності енергії ΔE та часу t , яка має відмінний фізичний зміст від невизначеності координат та імпульсу динамічної частинки $\Delta E t \hbar$. У збудженому стані атом чи ядро є нестабільними. Відповідно енергія збуджених рівнів не є строго визначеною і має певну ширину. Для нестационарного стану замкнутої системи встановлене співвідношення було підтверджене експериментально. В цьому випадку Δt – час характерний час зміни середнього значення в системі.

***Ключові слова:** невизначеність, координата, імпульс, ядро, атом, хвильове число.*

Постановка та обґрунтування актуальності проблеми. В закладах середньої та вищої освіти при навчанні розділу фізики, де вивчаються

проблеми мікросвіту, поняття невизначеності займає провідне місце. Аналіз шкільних підручників та посібників з фізики показав, що поняття невизначеності координат-імпульсу розкривається задовільно [2; 13; 15]. Проте невизначеність енергія-час залишається на рівні згадки [2]. В зв'язку з цим доцільно більш докладніше розглянути вказані поняття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. О.Ю. Завершнева здійснила аналіз застосування принципу невизначеності та доповнюваності у квантовій механіці та психології з точки зору проблеми методологічних запозичань [4]. К.М. Зикова досліджувала співвідношення невизначеностей Гейзенберга у формуванні фізичної картини світу [5].

Н.В. Подопрігора, А.В. Ткаченко розглянули вивчення співвідношень невизначеностей на засадах модельного та реального експериментів [10].

А.А. Дробін вивчав можливості введення «принципу невизначеності Гейзенберга» у курс фізики середньої школи [1].

Т.В. Корнілова розглядає принцип невизначеності в психології [6].

Під поняттям «невизначеність» розуміється сумнів у чомусь, певний параметр, який характеризує результати вимірювання певної величини та її розсіювання, флуктуацію значень, що приписуються вимірюваній величині [14, с. 876]. З математичної точки зору під невизначеністю фізичної величини розуміється статистична флуктуація результатів вимірювання, відхилення від середнього значення. Тому результатом вимірювання є випадкова величина. Фізичні чи технічні величини не можуть одночасно приймати точні значення [17, с. 465].

До 1978 року проблема поняття невизначеності у вимірюваннях величин не набула практичної актуальності. Міжнародний комітет мір і ваг у 1979 р. розпочав роботу з визначення еталону точності вимірювань. У 1986 р. така величина була узгоджена світовою науковою спільнотою. В Україні (2006 р.) було прийнято стандарт ДСТУ-Н РМГ 43-2006 «Застосування «Настанови з оцінювання невизначеності у вимірюваннях» [18].

Проте дослідники мало торкнулися проблеми методики навчання понять невизначеності Гейзенберга щодо координат та імпульсу та невизначеності Мандельштама-Тамма щодо енергії та часу.

Мета статті. Дослідити фізичний зміст співвідношення невизначеності Гейзенберга для координат та імпульсу і співвідношення невизначеності Мандельштама-Тамма для енергії та часу, встановити фізичну відмінність між ними та запропонувати методику навчання вказаних понять в закладах вищої освіти.

Методи дослідження. Теоретичний аналіз основних понять квантової фізики, синтез ідей Гейзенберга-Бора та Мандельштама-Тамма, порівняння співвідношень координат-імпульсів та енергії-часу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Математичний апарат квантової фізики починається з формули розподілу енергії у спектрі поглинання абсолютно чорного тіла Планка та постулату Бора про квантування орбіт електронів. При цьому математичний апарат квантової механіки бере початок з гіпотези Л. де Бройля (1924 р.): стан вільної частинки, яка має проекцію імпульсу на вісь, наприклад x , описується плоским хвильовим числом $k_x = \frac{2\pi}{\lambda}$, де λ – довжина хвилі. Тоді $p_x = \hbar k_x$. Так було започатковано корпускулярно-хвильовий дуалізм – зв'язок властивостей частинки з властивостями хвилі [11]. Аналізуючи дане співвідношення В. Гейзенберг у 1927 р. за підтримки Н. Бора вирішив усунути суперечність хвиля-частинка і виявити закономірність щодо розсіювання хвильових чисел у хвилі де Бройля та встановив співвідношення між точністю місцезнаходження частинки Δx у пакеті хвиль і шириною пакету хвиль $\Delta p_x \Delta x \geq \hbar/2$. Узагальнення вченого привело до формулювання відповідної концепції про універсальність встановленого співвідношення.

В основі концепції про універсальність співвідношення невизначеності лежить постулат, що добуток флуктуацій спряжених величин регулюється корелятором двох типів. Е. Шредингер та В. Гейзенберг, Н. Бор,

Л.С. Мандельштам, І.Є. Тамм [11] у різних моделях квантової механіки успішно реалізували даний принцип. Його фундаментальність у квантовій механіці полягає у тому, що будь-яка фізична система не може знаходитися у станах, де координати її центру інерції та імпульс можуть бути визначеними одночасно [17, с. 465]. З використанням цього принципу побудована квантова механіка Шредінгера, Гейзенберга, Дірака.

Зокрема, Е. Шредінгер (1926 р.) постулював рівняння опису еволюцію станів $\frac{2\pi}{ih} \frac{\delta(x,t)}{\delta t} = H(x,t)(x,t)$, де $H(x,t)$ – оператор енергії частинки (гамільтоніан). У випадку, коли $H(x,t)$ від часу не залежить, енергія частинки зберігається (є інтегралом руху), то мають місце стаціонарні стани частинок.

Коли позначити через Δx невизначеність координати x центру інерції, а через Δp_x невизначеність проекції імпульсу на вісь x , то їх добуток за порядком величини може бути не менше постійної Планка \hbar . Тут має місце середньоквадратичне відхилення координати та імпульсу від їх середнього значення. В канонічно спряжених змінних координат x, y, z та відповідних проекціях імпульсів p_x, p_y, p_z мають місце співвідношення $\Delta p_x \Delta x \geq \hbar/2$; $\Delta p_y \Delta y \geq \hbar/2$; $\Delta p_z \Delta z \geq \hbar/2$. Через мале значення постійної Планка невизначеність не проявляється у дослідах з макроскопічними тілами.

Таким чином, у квантовій фізиці, чим точніше дослідно визначається одна фізична величина, тим менш визначена друга, і ніякий експеримент не може привести до одночасного точного вимірювання обох динамічних величин. Це є об'єктивна властивість матерії.

Фізичний зміст полягає у наступному. Стан частинки визначається хвильовою функцією $\psi(x,t)$, яка є розв'язком рівняння Шредінгера. Частинку можна виявити у будь-якій точці простору, де хвильова функція набуває значень відмінних від нуля. В ході одного й того ж фізичного експерименту визначення координати частинки має ймовірнісний характер, тобто при проведенні серії дослідів кожного разу одержуються різні результати. Частина з них будуть найбільш ймовірно точнішими, частіше матимуть

майже однакові значення. Частота появи таких значень координати виявилася пропорційною квадрату модуля хвильової функції $|\psi(x,t)|^2$ у відповідних точках простору. Такі точки скупчуються поблизу максимуму модуля хвильової функції і складають хвильовий пакет. Аналогічні властивості має і проекція імпульсу на відповідні координати. Ймовірнісну інтерпретацію такого процесу обґрунтував М. Борн (1926 р.).

Релятивістську квантову механіку з використанням принципу невизначеності у 1930 р. побудував П. Дірак, що дало змогу передбачити існування античастинок та запровадити поняття фізичного вакууму.

У класичній механіці рух координати центру інерції тіл визначається другим законом Ньютона та проекціями імпульсів на відповідні координати. Постулюється, що у довільний момент часу стан центру інерції системи описується координатами (x, y, z) та проекціями імпульсу частинки на відповідні вісі (p_x, p_y, p_z) . Передбачається рух з малими, у порівнянні з швидкістю світла, швидкостями. Центр інерції розглядається як матеріальна точка. Рух матеріальної точки описується рівнянням

$$\frac{d(mv_x)}{dt} = m \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dp_x}{dt} = F_x, \text{ аналогічно для інших координат. Імпульс}$$

визначається як кількісна міра руху матеріальної точки, яка переміщається у просторі. Сила включає як зовнішні, так і внутрішні сили. За великих

швидкостей імпульс визначається за формулою $p = m \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. За малих

швидкостей, коли $v \ll c$ імпульс визначається як $p = mv$. Імпульс мають електромагнітне та гравітаційне поля, що характеризуються густиною і виражаються через напруженість та потенціал.

У всіх перерахованих випадках поняття імпульсу має власний фізичний зміст.

Координати у класичній механіці мають чітко виражений зміст. У момент часу t_l центр інерції має координати x_l, y_l, z_l і швидкість v_l . В момент

часу t_2 центр інерції має координати x_2, y_2, z_2 і швидкість v_2 . Послідовність таких моментів часу утворює траєкторію центру інерції.

Таким чином, невизначеність координат чи імпульсу рухомої матеріальної точки у класичній механіці у дослідах не виявлена. У кожен момент часу руху центру інерції матеріальної точки чітко фіксуються координати, а відповідно визначається швидкість та імпульс. Інша картина спостерігається при русі мікрочастинок.

Л.С. Мандельштам і І.Є. Тамм у 1929 році у журналі «Успіхи фізичних наук» надрукували статтю, де на основі досліджень Е. Фермі розглянуто проблему альфа- та бета-розпадів. Вони вперше ввели поняття невизначеності енергії ΔE та часу t , яка має відмінний фізичний зміст від невизначеності координат та імпульсу динамічної частинки $\Delta E t \hbar$. У навчальному посібнику І.М. Кучерука приводиться вивід цього співвідношення із невизначеності Гейзенберга [8, с. 301]. Такий прийом не зовсім вдалий, так як при цьому втрачається фізична відмінність між ними.

У збудженому стані атом чи ядро є нестабільними. Відповідно енергія збуджених рівнів не є строго визначеною і має певну ширину. Для нестационарного стану замкнутої системи встановлене співвідношення було підтвержене експериментально. В цьому випадку Δt – час характерний час зміни середнього значення в системі [7].

Дослідно енергію системи, що знаходиться у стаціонарному стані також можна визначити за час Δt взаємодії частинки з приладом, тобто часом вимірювання енергії. Точність вимірювання не буде перевищувати $\frac{\hbar}{t}$. Вчені підкреслили, що причина цього полягає у взаємодії системи з приладом. Визначити енергію взаємодії ΔE системи з приладом можна з невизначеності $\frac{\hbar}{t}$. Принцип визначає обмеження, яке не можна усунути ніяким удосконаленням приладу. Воно впливає з того факту, що взаємодіють об'єкти з різних світів: прилад зі світу макрооб'єктів, а спостерігачі з

мікросвіту. Тому вносяться спотворення, які неможливо усунути, а передбачити наступний стан мікрочастинки можна лише з певною ймовірністю [4]. Тому не випадково такі висновки приводять до дискусій, хід який і пропонуємо висвітлити в освітньому процесі вищої школи.

Висновки з дослідження і перспективи подальших розробок. Під час навчання теми невизначеності енергії-часу доцільно наголосити увагу суб'єктів навчання на наступному:

1. Е. Шредінгер та В. Гейзенберг у 1927 році прийшли до висновку, що імпульс не може бути локалізованим у просторі.

Л.С. Мандельштам та І.Є. Тамм самостійно прийшли до висновку, що не може бути локалізованою енергія у часі. У квантовій системі неможливо точно визначити енергію. Розглядаючи співвідношення $\Delta E \Delta t \geq \hbar$ вони посилалися на співвідношення $\Delta \omega \Delta t \geq 1$, так як невизначеність енергетичних рівнів квазіхроматичного випромінювання в частоті ω визначається $\Delta \omega$ в інтервалі часу Δt [9].

2. У квантомеханічній системі величина $\hbar \omega$ відповідає різниці енергетичних рівнів $E_1 - E_2$; $E_2 - E_3$ і т.д., а не енергії системи. Тому принцип відповідності тут втрачає зміст.

3. Співвідношення $\Delta p_x \Delta x \geq \hbar/2$ відрізняється від співвідношення $\Delta E \Delta t \geq \hbar$ тим, що у першому йде мова про невизначеність у координаті та імпульсі у часі, тоді коли друге говорить про невизначеність енергії і часу за заданої координати. Енергія системи не має певного значення та постійно змінюється в часі. Тому тут слід приділити увагу вимірювальному приладу. Енергію системи можна визначити лише з певною ймовірністю, що відповідає закону збереження енергії у квантовій механіці, на відміну від класичної механіки, де зберігається енергія з часом.

У квантовій механіці енергія зберігається лише для стаціонарних станів. Н. Бор звернув увагу на те, що неможливо визначити у квантовій механіці поняття монохроматичної хвилі в даний момент часу [7]. Адже ймовірність її знаходження в усіх точках простору однакова.

4. Введення поняття невизначеності для енергії-часу дозволило ввести поняття віртуальних переходів в порушення другого постулату Бора, коли енергія фотона є відмінною від різниці енергій початкового та кінцевого станів системи.

В.П. Крайнов [7] приводить приклад, коли перехід із збудженого $2s$ -стану атома водню в основний $1s$ -стан може відбуватися шляхом випускання двох фотонів самих різних енергій: ці переходи йдуть віртуально через різні порушення p -стану. А сума енергій цих фотонів хоча також може відрізнятись від різниці енергій початкового і кінцевого станів, але дуже незначно: в міру розкиду енергій, що визначається зі співвідношення $\Delta E \approx \hbar \omega$, де в даному випадку невизначеність у часі являє собою час життя збудженого стану $2s$.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з аналізом наукових пошуків учених у галузі квантової фізики та розробкою методики ознайомлення з ходом їх думок студентів закладів вищої освіти.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Дробін А.А. Методика навчання понять перервного та неперервного та їх співвідношення у курсі фізики середньої школи : [посіб. для викл. та студ. пед. вищ. навч. закл., учит. серед. навч. закл. освіти] / Дробін А.А. – Кіровоград: ТОВ «Поліграф-Сервіс», 2008. – 134 с.

2. Дробін А.А. Формування фізичних понять у школярів на основі статистичного та імовірнісного підходів: дис. ... канд. пед. наук: 13.00.02 / Дробін Андрій Анатолійович; М-во осв. і науки, молоді та спорту України Кіровоградський держ. пед. ун-т ім. В.Винниченка. – Кіровоград, 2012. – 325 с.

3. Гнатенко Х.П. Співвідношення невизначеностей у некомутативному фазовому просторі / Х.П. Гнатенко // Вісник Львівського університету. Серія фізична. – 2016. – Вип. 52. – С. 3-8. – Режим доступу: http://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/52_01.pdf

4. Завершнева Е.Ю. Принципы неопределенности и дополнительности в квантовой механике и психологии: проблема методологических заимствований / Е.Ю. Завершнева // Вестник Моск. ун-та. Серия 14: Психология. – 2001. – № 4. – С. 67-77; 2002. – № 1. – С. 75-80.

5. Зикова К.М. Співвідношення невизначеностей Гейзенберга у формуванні фізичної картини світу / К.М. Зикова // Наукові записки. Серія: Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти. – Кіровоград, 2017. – Вип. 11, Ч. 3. – С. 65-69.

6. Корнилова Т.В. Принцип неопределенности в психологии: основания и проблемы [Электронный ресурс] // Психологические исследования. – 2010. – № 3(11). – Режим доступа: <http://www.psystudy.ru/index.php/num/2010n3-11/320-kornilova11.html>

7. Крайнов В.П. Соотношения неопределенности для энергии и времени / В.П. Крайнов // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 5. – С. 77-82.

8. Кучерук І.М. Загальна фізика. Оптика. Квантова фізика: [навч. посіб.] / І.М. Кучерук, В.П. Дущенко. – К.: Вища школа, 1991. – 463 с.

9. Мандельштам Л.И. Соотношение неопределенности энергия-время в нерелятивистской квантовой механике / Л.И. Мандельштам, И.Е. Тамм // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1945. – Т. 9, № 1/2. – С. 122-128.

10. Подопригора Н.В. Вивчення співвідношень невизначеностей на засадах модельного та реального експериментів / Н.В. Подопригора, А.В. Ткаченко // Наукові записки. Серія: Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти. – Кіровоград, 2014. – Вип. 6. – С. 94-104.

11. Садовий М.І. Історія фізики з перших етапів становлення до початку ХХІ століття: [навч. посібн. для студ. ф.-м. фак. вищ. пед. навч. закл.] / М.І. Садовий, О.М. Трифонова. – Кіровоград: ПП «ЦОП «Авангард», 2013. – [2-ге вид. переробл. та доп.] – 436 с.

12. Садовий М.І. Становлення та розвиток фундаментальних ідей дискретності та неперервності у курсі фізики середньої школи / Садовий М.І. – Кіровоград: Прінт-Імідж, 2001. – 396 с.

13. Садовий М.І. Теоретичні і методичні основи становлення і розвитку фундаментальних ідей дискретності та неперервності в курсі фізики загальноосвітньої школи: дис. ... докт. пед. наук: 13.00.02 / Садовий Микола Ілліч; М-во осв. і науки України Нац. пед. ун-т імені М.П. Драгоманова. – К., 2001. – 517 с.

14. Советский энциклопедический словарь / гл. ред. А.М. Прохоров. – [3-е изд.] – М.: Советская энциклопедия, 1982. – 1600 с.

15. Трифонова О.М. Взаємозв'язки принципів науковості та наочності в умовах кредитно-модульної системи навчання квантової фізики студентів вищих навчальних закладів: дис. ... канд. пед. наук: 13.00.02 / Трифонова Олена Михайлівна; М-во осв. і науки України Кіровоградський держ. пед. ун-т ім. В.Винниченка. – Кіровоград, 2009. – Т. 1. – 216 с.; Т. 2: Додатки. – 301 с.

16. Трифонова О.М. Структурно-логічний підхід до удосконалення викладання фізики атома і атомного ядра / О.М. Трифонова // Наукові записки. – Серія: Педагогічні науки. – Кіровоград: РВВ КДПУ ім. В.Винниченка, 2014. – Вип. 60. – С. 225-230.

17. Физический энциклопедический словарь / гл. ред. А.М. Прохоров; ред. кол. Д.М. Алексов. – М.: Сов. энциклопедия, 1983. – 928 с.

18. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. – ISO, Switzerland, 1993 (GUM).

Sadovyi Mykola

Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State Pedagogical University

RATIO OF UNCERTAINTY IN RESEARCH: THE HISTORICAL ASPECT

Annotation. The article deals with the problem of uncertainty of physical quantities in the course of research. We give a general approach to the definition

of the concept of uncertainty, the role of fluctuations in their occurrence. The evolution of the ideas of de Broglie is disclosed that the state of a free particle has a projection of the momentum on the axis, for example, x . is described by a plane wave number. The role of de Broglie waves in the promotion of the concept of uncertainty of coordinates and momentum by Heisenberg is important. Practical use of this concept in the description of the microworld was made by Schrodinger. It is concluded that in quantum physics the more accurately one physical quantity is determined experimentally, the less definite a friend and no experiment can lead to a simultaneous accurate measurement of both dynamic quantities. This is an objective property of matter.

L.S. Mandelshtam and I.E. Tamm first introduced the concept of energy uncertainty ΔE and time Δt , which has an excellent physical meaning from the uncertainty of the coordinates and momentum of the dynamic particle $\Delta E \Delta t \geq \hbar$. In an excited state, the atom or nucleus is unstable. According to the energy of the excited levels, it is not strictly defined and has a certain width. For a nonstationary state of a closed system, the relationship was established experimentally. In this case, it is the characteristic time of the mean value change in the system.

In an excited state, the atom or nucleus is unstable. According to the energy of the excited levels, it is not strictly defined and has a certain width. For a nonstationary state of a closed system, the relationship was established experimentally. In this case, Δt is the characteristic time of the mean value change in the system.

While studying the topic of energy-time uncertainty, it is advisable to draw the attention of subjects to the training on the following. E. Schrodinger and V. Heisenberg in 1927 came to the conclusion that the impulse can not be localized in space. The Heisenberg ratio differs from the energy-time ratio in that the former refers to the uncertainty in the coordinate and momentum in time, when the second speaks of the uncertainty of energy and time over a given coordinate. The energy of the system does not have a definite value, but constantly changes in time, and

attention should be paid to measuring devices. The energy of the system can only be determined with a certain probability, which corresponds to the law of conservation of energy in quantum mechanics, in contrast to classical mechanics, where energy is stored with time.

Keywords: *invisibility, coordinate, momentum, nucleus, atom, wave number.*

Садовой Николай

*Центральноукраинский государственный педагогический университет имени
Владимира Винниченко*

СООТНОШЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ: ИСТОРИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Аннотация. В статье рассматривается проблема неопределенности физических величин в ходе проведения исследований. Дается общий подход определения понятия неопределенности, роль флуктуаций в их возникновении. Раскрывается эволюция идей Л. де Бройля в части роли волн де Бройля и выдвижения понятия неопределенности координат и импульса Гейзенбергом, использование этого понятия в описании микромира Шрёдингером. Делается вывод, что в квантовой физике, чем точнее экспериментально определяется одна физическая величина, тем менее определяется другая, и никакой эксперимент не может привести к одновременному точному измерению обеих динамических величин. Это объективное свойство материи. Л.С. Мандельштам и И.Е. Тамм впервые ввели понятие неопределенности энергии ΔE и времени Δt , которая имеет отличный физический смысл от неопределенности координат и импульса динамической частицы $\Delta E \Delta t \geq \hbar$. В возбужденном состоянии атом или ядро нестабильны. Согласно энергии возбужденных уровней не является строго определенной и имеет определенную ширину. Для нестационарного состояния замкнутой системы установленное соотношение было

подтверждено экспериментально. В этом случае Δt – время характерное время изменения среднего значения в системе.

***Ключевые слова:** неопределенность, координата, импульс, ядро, атом, волновое число.*

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

Садовий Микола Ілліч – доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри теорії та методики технологічної підготовки, охорони праці та безпеки життєдіяльності Центральноукраїнського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка.

Наукові інтереси: теорія та методика навчання (фізика та технології).

REFERENCES

1. Drobin A.A. Metodyka navchannya ponyat' perervnoho ta neperervnoho ta yikh spivvidnoshennya u kursi fizyky seredn'oyi shkoly : [posib. dlya vykl. ta stud. ped. vyshch. navch. zakl., uchyт. sered. navch. zakl. osvity] / Drobin A.A. – Kirovohrad: TOV «Polihraf-Servis», 2008. – 134 s.
2. Drobin A.A. Formuvannya fizychnykh ponyat' u shkolyariv na osnovi statystychnoho ta imovirnisnoho pidkhodiv: dys. ... kand. ped. nauk: 13.00.02 / Drobin Andriy Anatoliyovych; M-vo osv. i nauky, molodi ta sportu Ukrayiny Kirovohrads'kyu derzh. ped. un-t im. V.Vynnychenka. – Kirovohrad, 2012. – 325 s.
3. Hnatenko KH.P. Spivvidnoshennya nevyznachenostey u nekomutatyvnomu fazovomu prostori / KH.P. Hnatenko // Visnyk L'vivs'koho universytetu. Seriya fizychna. – 2016. – Vyp. 52. – S. 3-8. – Rezhym dostupu: http://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/52_01.pdf
4. Zavershneva Ye.YU. Printsipy neopredelennosti i dopolnitel'nosti v kvantovoy mekhanike i psikhologii: problema metodologicheskikh zaimstvovaniy / Ye.YU. Zavershneva // Vestnik Mosk. un-ta. Seriya 14: Psikhologiya. – 2001. – № 4. – S. 67-77; 2002. – № 1. – S. 75-80.

5. Zykova K.M. Spivvidnoshennya nevyznachenostey Heyzenberha u formuvanni fizychnoyi kartyny svitu / K.M. Zykova // Naukovi zapysky. Seriya: Problemy metodyky fizyko-matematychnoyi i tekhnolohichnoyi osvity. – Kirovohrad, 2017. – Vyp. 11, CH. 3. – S. 65-69.

6. Kornilova T.V. Printsip neopredelennosti v psikhologii: osnovaniya i problemy [Elektronnyy resurs] // Psikhologicheskiye issledovaniya. – 2010. – № 3(11). – Rezhim dostupu: <http://www.psystudy.ru/index.php/num/2010n3-11/320-kornilova11.html>

7. Kraynov V.P. Sootnosheniya neopredelennosti dlya energii i vremeni / V.P. Kraynov // Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal. – 1998. – № 5. – S. 77-82.

8. Kucheruk I.M. Zahal'na fizyka. Optyka. Kvantova fizyka: [navch. posib.] / I.M. Kucheruk, V.P. Dushchenko. – K.: Vyshcha shkola, 1991. – 463 s.

9. Mandel'shtam L.I. Sootnosheniye neopredelennosti energiya-vremya v nerelyativistskoy kvantovoy mekhanike / L.I Mandel'shtam, I.Ye. Tamm // Izv. AN SSSR. Ser. fiz. – 1945. – T. 9, № 1/2. – S. 122-128.

10. Podopryhora N.V. Vyvchennya spivvidnoshen' nevyznachenostey na zasadakh model'noho ta real'noho eksperymentiv / N.V. Podopryhora, A.V. Tkachenko // Naukovi zapysky. Seriya: Problemy metodyky fizyko-matematychnoyi i tekhnolohichnoyi osvity. – Kirovohrad, 2014. – Vyp. 6. – S. 94-104.

11. Sadovyy M.I. Istoriya fizyky z pershykh etapiv stanovlennya do pochatku KHKHI stolittya: [navch. posibn. dlya stud. f.-m. fak. vyshch. ped. navch. zakl.] / M.I. Sadovyy, O.M. Tryfonova. – Kirovohrad: PP «TSOP «Avanhard», 2013. – [2-he vyd. pererobl. ta dop.] – 436 s.

12. Sadovyy M.I. Stanovlennya ta rozvytok fundamental'nykh idey dyskretnosti ta neperervnosti u kursi fizyky seredn'oyi shkoly / Sadovyy M.I. – Kirovohrad: Print-Imidzh, 2001. – 396 s.

13. Sadovyy M.I. Teoretychni i metodychni osnovy stanovlennya i rozvytku fundamental'nykh idey dyskretnosti ta neperervnosti v kursi fizyky zahal'noosvitn'oyi shkoly: dys. ... dokt. ped. nauk: 13.00.02 / Sadovyy Mykola

Illich; M-vo osv. i nauky Ukrayiny Nats. ped. un-t imeni M.P. Drahomanova. – K., 2001. – 517 s.

14. Sovetskiy entsiklopedicheskiy slovar' / gl. red. A.M. Prokhorov. – [3-ye izd.] – M.: Sovetskaya entsiklopediya, 1982. – 1600 s.

15. Tryfonova O.M. Vzayemozv'yazky pryntsyviv naukivosti ta naochnosti v umovakh kredytno-modul'noyi systemy navchannya kvantovoyi fizyky studentiv vyshchyykh navchal'nykh zakladiv: dys. ... kand. ped. nauk: 13.00.02 / Tryfonova Olena Mykhaylivna; M-vo osv. i nauky Ukrayiny Kirovohrads'kyy derzh. ped. un-t im. V.Vynnychenka. – Kirovohrad, 2009. – T. 1. – 216 s.; T. 2: Dodatky. – 301 s.

16. Tryfonova O.M. Strukturno-lohichnyy pidkhid do udoskonalennya vykladannya fizyky atoma i atomnoho yadra / O.M. Tryfonova // Naukovi zapysky. – Seriya: Pedahohichni nauky. – Kirovohrad: RVV KDPU im. V.Vynnychenka, 2014. – Vyp. 60. – S. 225-230.

17. Fizicheskiy entsiklopedicheskiy slovar' / gl. red. A.M. Prokhorov; red. kol. D.M. Aleksov. – M.: Sov. entsiklopediya, 1983. – 928 s.

18. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. – ISO, Switzerland, 1993 (GUM).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sadovyi Mykola Illich – doctor of pedagogical sciences, professor, manager of department of theory and method of technological preparation, labour and safety of vital functions protection, professor of department of physics and method of its teaching of the Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State Pedagogical University.

Circle of research interests: theory and methodology of teaching (physics and labor training)