

РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 535.651

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.2-13.02>

ДЕЯКІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ У ПРОЦЕСІ ВИВЧЕННЯ ГОЛОВНИХ КВАНТОВИХ ЧИСЕЛ ЛІНІЙ СЕРІЇ БАЛЬМЕРА: КОМПЕТЕНТНІСНІ НАВИЧКИ З ФІЗИКИ В КУРСАНТІВ-СУДНОВОДІВ

Н.Б. Тірон-Воробйова¹, О.Д. Іванов²

¹к. т. н., доцент кафедри загальнонаукових дисциплін,
Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»,
Ізмаїл, Одеська область, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-8269-2682

²асистент кафедри загальнонаукових дисциплін, завідувач лабораторії фізики,
Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»,
Ізмаїл, Одеська область, Україна

Анотація

Вступ. Обґрунтовано актуальність теми дослідження щодо спектрів випромінювання/поглинання атомів, що не взаємодіють. Будова атома визначається інтенсивністю та частотами спектральних ліній, це відокремлена особливість – обґрунтування використання спектрального аналізу як методу ідентифікації відповідних природних речовин за їхньою хімічною будовою, внутрішнім складом, окремими фізичними характеристиками. Теоретичний опис станів атомів і молекул ґрунтується на застосуванні законів квантової механіки. **Метою** статті є вивчення головних квантових чисел ліній серії Бальмера із застосуванням відповідної послідовності конкретних дій, розроблених і втілених здобувачами вищої освіти морського спрямування, з установленням структурних зв'язків між змінними та елементами досліджуваної системи на базі системного аналізу, а також підвищення компетентних якостей здобувачів вищої освіти з опрацювання експериментальної частини дослідження в межах освітньої компоненти «Фізика». **Результати.** Дослідження ґрунтується на певній послідовності дій, розроблених здобувачами вищої освіти, задля накопичення знань, умінь і навичок з освітньої компоненти «Фізика» (розділ «Квантова механіка»). У роботі використано монохроматор-спектроскоп УМ 2 (прилад 2-го покоління). Як наочний приклад показана послідовність дій на основі системного аналізу з отриманням відповідного результату – визначенням за відліком за мікрометричним обладнанням довжин хвиль (відповідного спектру), градування монохроматора з подальшим винаходженням значення головних квантових чисел ліній серії Бальмера. Побудовано фрагмент енергетичного спектра атома водню (із застосуванням як досліджуваної речовини водню у спектральній лампі). **Висновки.** Здобувачами вищої освіти отримано відпо-

© Тірон-Воробйова Н.Б., Іванов О.Д., 2022

відні навички, зокрема з розв'язування складних спеціалізованих завдань і практичних проблем у сфері квантової фізики відповідної компоненти. Сформовано здатність обґрунтовувати власну позицію, відробляти відповідні покрокові інструкції в межах застосування системного аналізу, застосовувати відповідні теорії, концепції у сфері морської інженерії.

Ключові слова: системний аналіз, фізика, судноводії, компетентнісні навички з фізики, квантові лінії серії Бальмера.

**SOME ASPECTS OF THE APPLICATION OF SYSTEMS ANALYSIS
IN THE STUDY OF THE MAIN QUANTUM NUMBERS OF THE LINES
OF THE BALMER SERIES: COMPETENCY SKILLS IN PHYSICS
IN CADETS-SEAFARERS**

N.B. Tiron-Vorobiova¹, O.D. Ivanov²

¹PhD, Associate Professor at the Department of General Scientific Disciplines,
Danube Institute of National University "Odessa Maritime Academy",
Izmail, Odesa region, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-8269-2682

²Assistant at the Department of General Scientific Disciplines,
Head of the Laboratory of Physics,
Danube Institute of National University "Odessa Maritime Academy",
Izmail, Odesa region, Ukraine

Summary

Introduction. The relevance of the research topic with respect to the emission/absorption spectra of non-interacting atoms is given. The structure of the atom is determined by the intensity and frequency of spectral lines, this is a separate feature – the rationale for the use of spectral analysis as a method of identifying relevant natural substances by their chemical structure, internal composition, and individual physical characteristics. The theoretical description of the states of atoms and molecules is based on the application of the laws of quantum mechanics. **Purpose.** Study of the main quantum numbers of the Balmer series, using the appropriate sequence of specific actions developed and implemented by marine higher education seekers, with the establishment of structural relationships between variables and elements of the studied system – based on systems analysis. Improving the competent qualities of higher education students in the development of the experimental part of the study within the educational component "Physics". **Results.** The research is based on a certain sequence of actions developed by applicants for higher education, in order to accumulate knowledge, skills, and abilities in the educational component "Physics" (section "Quantum Mechanics"). The monochromator spectroscope UM 2 (2nd generation device) was used in the work. As a clear example, the sequence of actions based on system analysis is shown, with the corresponding result – determination by reference to micrometric equipment of wavelengths (corresponding spectrum), Balmer. A fragment of the energy spectrum of a hydrogen atom was constructed (using hydrogen as a test substance in a spectral lamp). **Conclusions.** Applicants for higher education have acquired relevant skills, in particular in solving complex specialized problems and practical problems in the field of quantum physics of the relevant component; the ability to substantiate their own point of

view, to develop appropriate step-by-step instructions within the application of systems analysis, applying relevant theories, concepts in the field of marine engineering.

Key words: systems analysis, physics, navigators, competency skills in physics, quantum lines of the Balmer series.

Вступ. З дослідження відомо, що спектри випромінювання й поглинання атомів, що не взаємодіють, лінійчаті, тобто складаються з окремих вузьких смуг – спектральних ліній. Частоти (довжини хвиль) та інтенсивності спектральних ліній визначаються будовою атома і є строго індивідуальними: кожен сорт атомів має тільки йому властивий спектр. На цьому ґрунтується спектральний аналіз [1] – метод визначення хімічного складу речовини за її оптичним спектром. Вивчення оптичних спектрів є дуже цінним також для теорії, оскільки дає важливу інформацію про внутрішню будову та властивості атомів і молекул.

Атоми й молекули не підпорядковані законам класичної фізики. Теоретичний опис їхніх станів можливий тільки на основі квантової механіки та зводиться до розв'язання основного рівняння квантової механіки – рівняння Шредінгера, яке визначає закон еволюції квантової системи із часом [2, с. 389–394]:

$$\nabla^2\psi + \frac{2m}{\hbar^2}\left(E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)\psi = 0.$$

Розв'язання рівняння Шредінгера показує, що зв'язані стани електрона ($E < 0$) в атомі водню є дискретними («квантовими») і визначаються квантовими числами:

- головним квантовим числом $n = 1, 2, 3, \dots$;
- орбітальним квантовим числом $l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$;
- магнітним квантовим числом $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$.

Постановка проблеми. Е. Резерфорд у результаті аналізу дослідів із розсіювання α -частинок, що пройшли через тонку металеву фольгу, запропонував ядерну модель атома: атом складається з ядра, навколо якого обертаються електрони (1913 р.).

Однак ядерна модель увійшла у протиріччя із законами класичної фізики та електродинаміки. З погляду класичної електродинаміки такий атом має бути нестійким. Це пов'язано з тим, що обертання електрона навколо ядра (як і будь-який орбітальний рух) є прискореним, тому він повинен безупинно випромінювати електромагнітні хвилі. Процес випромінювання супроводжується втратою енергії, тому електрон повинен зрештою впасти на ядро. Крім того, спектр випромінювання такого атома має бути суцільним [3].

Тим часом атом – стійке утворення, і, як показує дослідження, його спектр випромінювання/поглинання лінійчатий. Наприклад, частоти ліній у спектрі випромінювання атома водню відповідають співвідношенню (узагальненій формулі Бальмера):

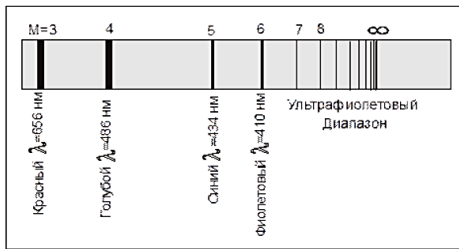
$$\nu = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right), \quad (1)$$

де R – стала Рідберга; m і n – цілі числа, причому $m > n$.

Останнє формулювання добре описує закономірності у спектрі випромінювання атома водню [4], які встановлені експериментально різними авторами.

У цьому спектрі були виділені серії, кожна з яких отримана з формули (1) за визначених фіксованих значень числа m та значень n , які є рівними $(m-1)$, $(m+2)$. Як приклад показано частину спектра випромінювання водню, що відповідає серії Бальмера.

Серія Лаймана	$\nu = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$(n=2,3,4,\dots)$
Серія Бальмера	$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$(n=3,4,5,\dots)$
Серія Пашена	$\nu = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$(n=4,5,6,\dots)$
Серія Брекета	$\nu = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$(n=5,6,7,\dots)$
Серія Пфунда	$\nu = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$(n=6,7,8,\dots)$



Аналіз останніх досліджень і публікацій. У зв'язку з протиріччям законам класичної фізики та електродинаміки для усунення цих труднощів Н. Бор висунув два постулати.

З усієї безлічі можливих орбіт реалізуються тільки ті з них, для яких момент імпульсу електрона є цілим кратним величини $h/2\pi$:

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}, \quad (2)$$

де h – стала Планка, $n = 1, 2, \dots$.

Орбіти, що відповідають умові (2), називають стаціонарними. Знаходячись на стаціонарних орбітах, електрон не випромінює та не поглинає енергію, тобто вона залишається *const*.

У разі переходу з однієї стаціонарної орбіти на іншу електрон поглинає/випромінює фотон, енергія якого становить:

$$h\nu = w_m - w_n, \quad (3)$$

де w_m – енергія електрона на n -ій орбіті.

З огляду на ці постулати Н. Бору вдалося пояснити закономірності у спектрах воднеподібних атомів, що описуються формулою (1).

У разі застосування системного аналізу – послідовності знаходження кожної з фізичних величин – шляхом інтерпретування формул винаходять радіус n -ої електронної орбіти: 1) радіус n -ої стаціонарної орбіти електрона; 2) радіус n -ої електронної орбіти з огляду на те, що під час руху електрона по колу радіуса r на нього діє доцентрова сила mv^2/r , якою є сила кулонівської взаємодії ядра й електрона.

Повна енергія атома водню складається з кінетичної та потенціальної енергії електрона (з «мінусом»: енергія притягання). Енергія атома може приймати лише

дискретні значення. Формула (1), відповідно, відображає винаходження частоти фотона з більшою енергією у стан із меншою енергією.

Формулювання цілей статті. Метою роботи є вивчення головних квантових чисел ліній серії Бальмера із застосуванням послідовності дій з установаження структурних зв'язків між змінними та елементами досліджуваної системи (системного аналізу), а також набуття здобувачами вищої освіти компетентнісних навичок з освітньої компоненти «Фізика».

Виклад основного матеріалу дослідження. В експерименті застосовувалися такі прилади та обладнання: монохроматор УМ-2, спектральна ртутна лампа ДРС-50, спектральна лампа водню.

У представленій роботі універсальний монохроматор УМ-2 використовується як спектроскоп (див. рис. 1, 2).

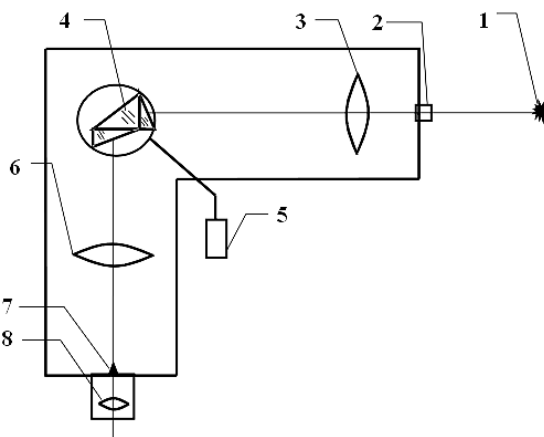


Рис. 1. Схематичне зображення монохроматора УМ-2:
1 – джерело світла (ртутна або інша лампа);
2 – вхідна щілина монохроматора; 3 – вхідний об'єктив;
4 – складна спектральна призма Аббе;
5 – мікрометричний гвинт із відліковим барабаном;
6 – вхідний об'єктив (коліматор); 7 – покажчик; 8 – окуляр

Перш ніж приступити до вивчення спектрів різних джерел, потрібно зробити градування монохроматора, тобто визначити довжини хвиль, що відповідають розподілам шкали барабана. Для цього використовується джерело світла з відомим спектром (наприклад, ртуті, неону, гелію). У представленій роботі для градування застосовується спектр ртуті [5; 6].

Примітка: ртутна лампа та лампа водню – потужні джерела світла, вибухонебезпечні. Під час роботи у ртутній лампі надзвичайно підвищується тиск, тому працювати з нею потрібно дуже обережно. Увімкнення та вимкнення ламп робить тільки завідувач лабораторії.


Порядок роботи:

1. Порядок виконання градування монохроматора УМ-2:

- 1) встановити ртутну лампу та зробити юстировку;
- 2) встановити ширину вхідної щілини (2) приладу (близько 0,1–0,2 мм);

3) сфокусувати окуляр (8);

4) викрутити барабан (5) призми так, щоб покажчик барабана був у крайньому

правому положенні. В окулярі можна побачити темне поле,  зліва буде видно фіолетову частину спектра ртуті;

5) повільно обертаючи барабан (5), зміщувати спектр вправо доти, доки не сполучиться покажчик окуляра з першою помітною лінією спектра ртуті (це фіолетова лінія). Перевірити фокусування окуляра (8) та добитися різкого зображення лінії. Ще раз перевірити сполучення лінії з покажчиком;

6) записати в таблицю 1 довжину лінії спектра λ (нм), орієнтуючись на рисунок 3 та значення n розподілу на барабані (кути повороту барабана);

7) так само повільно обертати барабан (5) до сполучення покажчика з кожною наступною відомою лінією (увесь спектр від фіолетових до червоних ліній), записати в таблицю 1 значення λ й n ;

8) пройшовши всю шкалу барабана до кінця, проробити зазначені дії у зворотному напрямі (усі виміри необхідно виконати тричі);

9) визначити середні значення всіх отриманих даних;

10) побудувати графік $n(\lambda)$, де будуть відображені дані таблиці 1 (див. рис. 4): по осі ординат відкласти довжини хвиль, по осі абсцис – відповідні кути n .



Рис. 2. Наочне зображення універсального монохроматора УМ-2

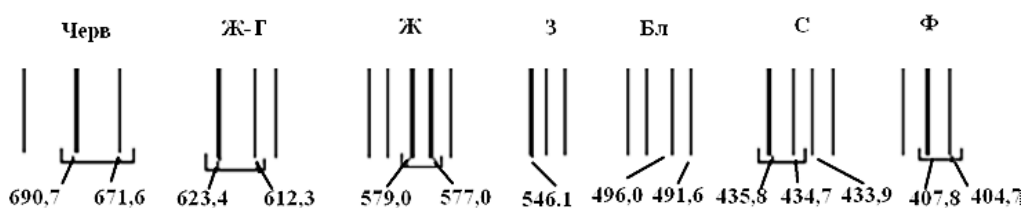


Рис. 3. Спектр ртуті, нм

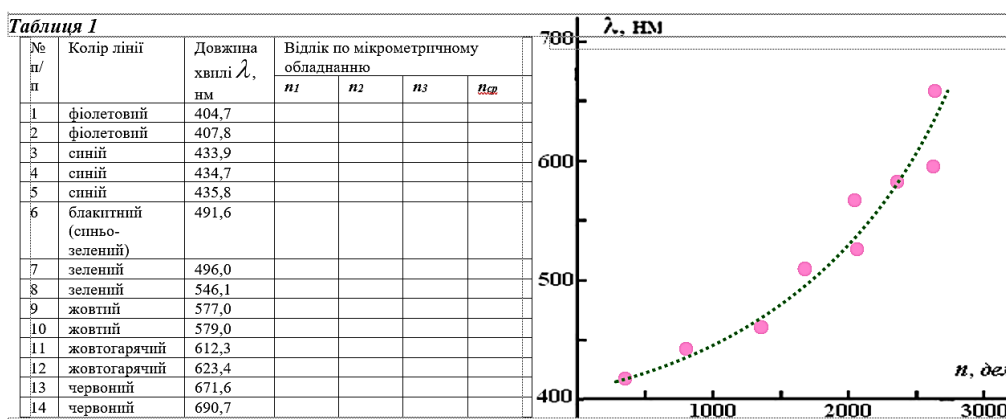


Рис. 4. Залежність n від λ згідно з проведеним градуванням монохроматора

2. Вивчення спектра випромінювання атома водню:

- 1) перед щілиною монохроматора УМ-2 розмістити лампу, заповнену воднем, підключити до мережі;
- 2) лінії водню по черзі наводяться на відлікове вістря, знімаються показання мікрометричного пристрою та за допомогою кривої градування визначаються довжини хвиль. Результати занести в таблицю 2;
- 3) з використанням отриманих значень довжин хвиль побудувати на рисунку фрагмент енергетичного спектра атома водню (рис. 5).

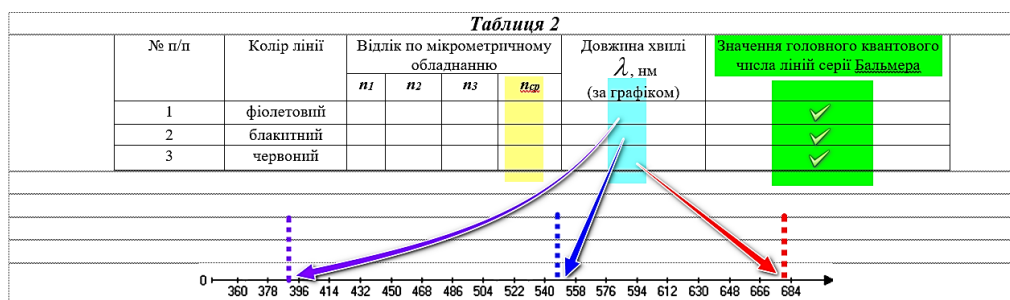


Рис. 5. Довжини хвиль атома водню

3. Визначення головних квантових ліній серії Бальмера.

Частота ліній серії Бальмера описується формулою:

$$\nu = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right). \quad (4)$$

Оскільки $v=c/\lambda$, де c – швидкість світла, то $\frac{c}{\lambda_n} = R(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2})$. Отже,
 $\frac{1}{\lambda_n} = R^*(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2})$, де $R^* = \frac{R}{c} = 1,097 \cdot 10^{-2} \text{ нм}^{-2}$.

У процесі розв'язання рівняння відносно n одержимо:

$$n = 2 \sqrt{\frac{\lambda_n R^*}{\lambda_n R^* - 4}} \quad (5)$$

Як приклад наочно продемонстровано методику виконання експериментальної частини роботи (рис. 6). Відповідно до застосування системного аналізу здобувачами вищої освіти побудовано алгоритм прийняття конкретного рішення, пов'язаного з формулюванням проблеми, визначенням цілей, визначенням критеріїв досягнення цілей, побудовою (графічно) моделі для обґрунтування рішень, пошуком найбільш оптимального варіанту рішення, узгодженням, затвердженням рішення, керуванням перебігом реалізації рішення (у цьому експерименті – достатня точність і результативність вимірювань), перевіркою ефективності рішення.

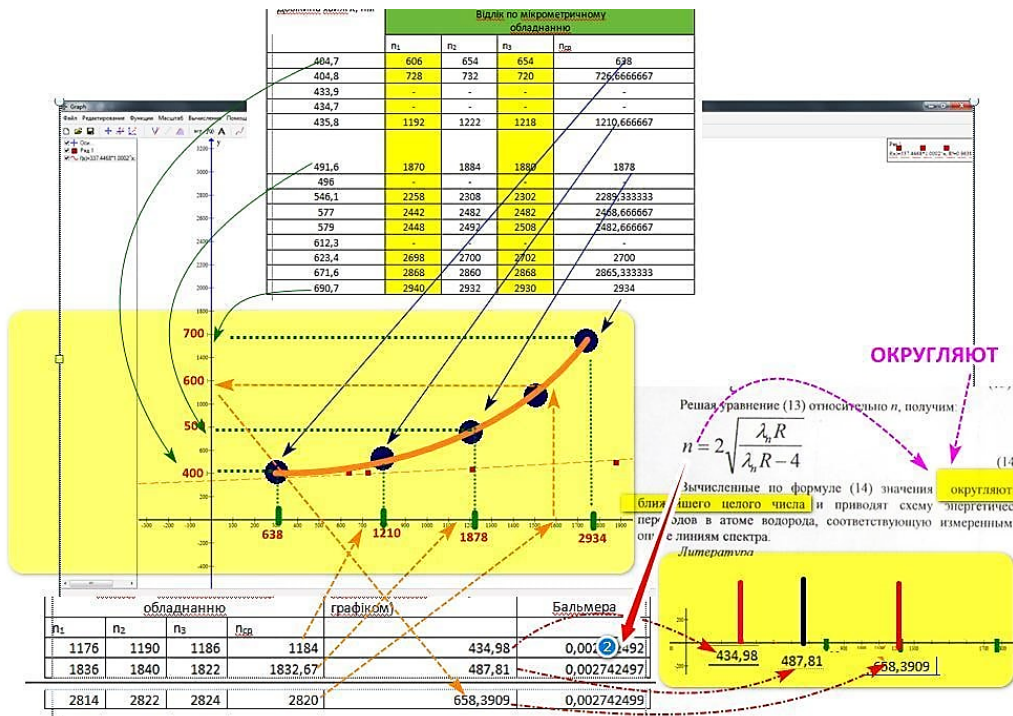


Рис. 6. Наочне відображення виконання експериментальної частини роботи (послідовність дій): застосування системного аналізу

Висновки та перспективи подальших досліджень. Здобувачами вищої освіти морської галузі у процесі вивчення освітньої компоненти «Фізика», а саме розділу «Квантова фізика», набуті такі компетентності:

- здатність розв’язувати складні спеціалізовані завдання та вирішувати практичні проблеми у сфері суднової інженерії, що передбачають застосування різноманітних теорій і методів, а також здатність до подальшого навчання;
- критичне осмислення основних теорій, принципів і понять сучасної морської інженерії;
- здатність збирати та інтерпретувати інформацію, вибирати методи й інструментальні засоби, застосовувати інноваційні підходи для розв’язання складних професійних завдань у сфері морської інженерії;
- здатність обґрунтовувати власну позицію та формулювати висновки з використанням основних теорій і концепцій у сфері морської інженерії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Катренко А. В. Системний аналіз : підручник / за ред. В. В. Пасічника. Львів : Новий Світ-2000, 2011. 396 с.
2. Михайленко В. І., Белоус В. М., Поповський Ю. М. Загальна фізика : підручник. Київ, 1993. 549 с.
3. Глосарій термінів з хімії / уклад.: Й. О. Опейда, О. П. Швайка. Донецьк : Вебер, 2008. 738 с.
4. The Hydrogen 21-cm Line. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/h21.html>
5. Вакарчук І. О. Квантова механіка : підручник. 4-те вид., доп. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2012. 872 с.
6. Збірник задач з квантової механіки / І. О. Вакарчук, Т. В. Кулій, О. В. Книгініцький, В. М. Ткачук. Львів : Львівський університет, 1996. 32 с.

REFERENCES

1. Katrenko, A. V. (2011). *System analysis : textbook [Systemnyi analiz : pidruchnyk]* / ed. by V. V. Pasichnyk. Lviv : Novyi Svit-2000, 396 p. [in Ukrainian]
2. Mykhailenko, V. I., Bielous, V. M., Popovskiy, Yu. M. (1993). *General physics : textbook [Zahalna fizyka : pidruchnyk]*. Kyiv, 549 p. [in Ukrainian]
3. Opeida, Y. O., Shvaika, O. P. (eds.) (2008). *Glossary of chemistry terms [Hlosarii terminiv z khimii]*. Donetsk : Veber, 738 p. [in Ukrainian]
4. N. d. (2022). The Hydrogen 21-cm Line. Retrieved from: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/h21.html> [in English]
5. Vakarchuk, I. O. (2012). *Quantum mechanics : textbook [Kvantova mekhanika : pidruchnyk]*, 4th ed., suppl. Lviv : Ivan Franko National University of Lviv, 872 p. [in Ukrainian]
6. Vakarchuk, I. O., Kulii, T. V., Knihinitskyi, O. V., Tkachuk, V. M. (1996). *Collection of problems in quantum mechanics [Zbirnyk zadach z kvantovoi mekhaniky]*. Lviv : Lviv University, 32 p. [in Ukrainian]