

Волинський національний університет
імені Лесі Українки

ФІЗИКА ТА ОСВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Випуск 1



Видавничий дім
«Гельветика»
2022

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Мирончук Галина Леонідівна – доктор фізико-математичних наук, професор, директор навчально-наукового фізико-технологічного інституту Волинського національного університету імені Лесі Українки (головний редактор);

Галян Володимир Володимирович – доктор фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Головацький Володимир Анатолійович – доктор фізико-математичних наук професор, професор кафедри теоретичної фізики та комп'ютерного моделювання Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича;

Голодюк Лариса Степанівна – доктор педагогічних наук, доцент, заступник директора з науково-методичної діяльності КЗ «Кіровоградський обласний інститут післядипломної педагогічної освіти імені Василя Сухомлинського»;

Заболотний Володимир Федорович – доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри фізики і методики навчання фізики, астрономії Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського;

Кажукаускас Вайдотас – доктор фізико-математичних наук, професор, головний науковий співробітник групи дослідження фотоелектричних явищ Інституту фотоніки та нанотехнологій Вільнюського університету, м. Вільнюс, Литовська Республіка;

Кевшин Андрій Григорович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, заступник директора з наукової роботи навчально-наукового фізико-технологічного інституту Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Озга Катаржина – доктор наук, професор Ченстоховського політехнічного університету, м. Ченстохова, Республіка Польща;

Пясецький Міхал Войцех – доктор наук, професор Гуманітарно-природничого університету імені Яна Длугоша в Ченстоховій, м. Ченстохова, Республіка Польща;

Рудиш Мирон Ярославович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, старший науковий співробітник кафедри загальної фізики Львівського національного університету імені Івана Франка;

Савош Валентин Олексійович – кандидат педагогічних наук, завідувач відділу фізико-математичних дисциплін Волинського інституту післядипломної педагогічної освіти;

Сахнюк Василь Євгенович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А.В. Свідзинського Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Сільвейстр Анатолій Миколайович – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри фізики і методики навчання фізики, астрономії Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського;

Сосницька Наталія Леонідівна – доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри вищої математики і фізики Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного;

Трифорова Олена Михайлівна – доктор педагогічних наук, доцент, доцент кафедри природничих наук та методик їхнього навчання Центральноукраїнського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка

Хижун Олег Юліанович – доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу спектроскопії поверхні новітніх матеріалів Інституту проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича Національної академії наук України;

Шигорін Павло Павлович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А.В. Свідзинського Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Юхимчук Володимир Олександрович – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу оптики і спектроскопії напівпровідникових і діелектричних матеріалів Інституту фізики напівпровідників імені В.С. Лашкарьова;

Яцюк Світлана Миколаївна – кандидат педагогічних наук, доцент, декан факультету інформаційних технологій і математики Волинського національного університету імені Лесі Українки.

Журнал ухвалено до друку Вченою радою
Волинського національного університету імені Лесі Українки
29 вересня 2022 р., протокол № 12

Науковий журнал «Фізика та освітні технології»
zareєстровано Міністерством юстиції України
(Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
серія КВ № 24970–14910Р від 30.08.2021 року)

«Фізика та освітні технології» включено до Переліку наукових фахових видань України категорії Б у галузі освіта/ педагогіка (спеціальності 014 – Середня освіта (за предметними спеціальностями); 104 – Фізика та астрономія; 105 – Прикладна фізика та наноматеріали) відповідно до Наказу МОН України № 1290 від 30 листопада 2021 року (додаток 3); Наказу МОН України № 530 від 06 червня 2022 року (додаток 2).

Офіційний сайт видання: www.journals.vnu.volyn.ua/index.php/physics

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

ISSN 2786-5444 (print)
ISSN 2786-5452 (online)

© Волинський національний університет імені Лесі Українки, 2022

УДК 537.612.2, 537.612.3

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-1>

Володимир ГОЛОВАЦЬКИЙ

доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри термоелектрики та медичної фізики, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2, м. Чернівці, Україна, 58012

ORCID ID: 0000-0002-5573-2562

SCOPUS-AUTHOR ID: 6507899727

Ігор ГОЛОВАЦЬКИЙ

аспірант кафедри термоелектрики та медичної фізики, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2, м. Чернівці, Україна, 58012

ORCID ID: 0000-0002-4435-4607

SCOPUS-AUTHOR ID: 57202987360

Бібліографічний опис статті: Головацький, В., Головацький, І., (2022). Розрахунок сили взаємодії циліндричних та кільцевих магнітів. *Фізика та освітні технології*, 1, 3–14, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-1>

РОЗРАХУНОК СИЛИ ВЗАЄМОДІЇ ЦИЛІНДРИЧНИХ МАГНІТІВ

Мета даної роботи – розрахувати розподіл індукції магнітного поля кільцевого магніту та дослідити силу його взаємодії з циліндричним магнітом для можливості використання їх у якості магнітної пружини.

Розрахунок розподілу індукції магнітного поля циліндричного та кільцевого магнітів виконано на основі методу віртуальних магнітних зарядів та шляхом використання скалярного магнітного потенціалу. Побудовано карту магнітного поля кільцевого магніту та досліджено її еволюцію у залежності від геометричних параметрів магніту. Доведено існування точок нульового поля на осі магніту поблизу його торців, в яких змінюється напрямок поля на протилежний. Отримано аналітичний вираз для індукції магнітного поля на осі кільцевого магніту, на основі якого розраховано залежність сили взаємодії магніту з точковим магнітним диполем.

Методом віртуальних магнітних зарядів та числовим інтегруванням розраховано силу взаємодії трубчатого та циліндричного магнітів довільних розмірів. Визначено межі застосовності моделі точкового магнітного диполя для циліндричного магніту. Досліджено магнітні пружини з різними силовими характеристиками. Знайдено такі геометричні розміри магнітів, при яких сила їх взаємодії у робочій області не залежить від зміщення.

Результати теоретичних досліджень, що виконані у даній роботі, якісно та кількісно узгоджуються з відомими експериментальними даними і дозволяють удосконалити силові характеристики магнітної пружини.

На основі виконаних досліджень в системі Wolfram Mathematica створено комп'ютерну модель, що демонструє карту магнітного поля кільцевого чи трубчатого магніту довільного розміру, а також комп'ютерну модель магнітної пружини на його основі трубчатого та циліндричного магнітів. Комп'ютерні моделі опубліковано з відкритим кодом на сайті Wolfram Demonstration Project і можуть використовуватись як у навчальному процесі, так і для конструювання магніто-механічних пристроїв.

Ключові слова: постійний магніт, магнітне поле, магнітний скалярний потенціал, взаємодія магнітів, метод магнітних зарядів.

Volodymyr HOLOVATSKY

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor at the Department of Thermoelectricity and Medical Physics, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2 Kotsyubynsky str., Chernivtsi, Ukraine, 58012

ORCID ID: 0000-0002-5573-2562

SCOPUS-AUTHOR ID: 6507899727

Ihor HOLOVATSKYI

Postgraduate Student at the Department of Thermoelectricity and Medical Physics, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2 Kotsyubynsky str., Chernivtsi, Ukraine, 58012

ORCID ID: 0000-0002-4435-4607

SCOPUS-AUTHOR ID: 57202987360

To cite this article: Holovatsky, V. and Holovatskyi, I. (2022). Rozrakhunok syly vzaiemodii tsylindrychnykh ta kiltsevykh mahnitiv [Magnetic spring on the base ring magnet]. *Physics and Educational Technology*, 1, 3–14, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-1>

MAGNETIC SPRING ON THE BASE RING MAGNET

The purpose of this work is to calculate the magnetic field induction distribution of a ring magnet and to investigate the force of its interaction with a cylindrical magnet for the possibility of using them as a magnetic spring.

The calculation of the magnetic field induction distribution of cylindrical and ring magnets was performed on the basis of the method of virtual magnetic charges and by using the scalar magnetic potential. A map of the magnetic field of a ring magnet was constructed and its evolution was investigated depending on the geometrical parameters of the magnet. The existence of points of zero field on the axis of the magnet near its ends, where the direction of the field changes to the opposite, has been proved. An analytical expression for the induction of the magnetic field on the axis of the ring magnet was obtained, on the basis of which the dependence of the force of interaction of the magnet with a point magnetic dipole was calculated.

Using the method of virtual magnetic charges and numerical integration, the force of interaction between tubular and cylindrical magnets of arbitrary sizes was calculated. The limits of applicability of the point magnetic dipole model for a cylindrical magnet are determined. Magnetic springs with different strength characteristics were studied. Such geometric dimensions of magnets were found, in which the force of their interaction in the working area does not depend on displacement.

The results of the theoretical research carried out in this paper qualitatively and quantitatively agree with the known experimental data and allow to improve the strength characteristics of the magnetic spring.

On the basis of the conducted research, a computer model was created in the Wolfram Mathematica system, showing a map of the magnetic field of a ring or tubular magnet of arbitrary size, as well as a computer model of a magnetic spring based on tubular and cylindrical magnets. The computer models are published as open source on the Wolfram Demonstration Project website and can be used both in the educational process and for the construction of magneto-mechanical devices.

Key words: permanent magnet, magnetic field, magnetic scalar potential, interaction of magnets, method of magnetic charges.

ВСТУП

На даний час на основі рідкоземельних металів створюють потужні постійні магніти різних розмірів та форми, які зберігають намагнічення десятки років при температурах, що не перевищують точку Кюрі. Це дозволяє широко використовувати постійні магніти у якості магнітних пружин, амортизаторів, віброізоляторів і навіть підшипників.

Отже, розрахунок силових характеристик магнітних систем, що складаються з постійних магнітів, є актуальною задачею сучасного приладобудування.

Взаємодія постійних магнітів відбувається через магнітне поле, яке, на відміну від електростатичного, соленоїдальне (вихрове), а лінії індукції є замкнутими. У загальному випадку для опису магнітного поля вводиться векторний потенціал, розрахунок якого складніший, ніж розрахунок скалярного електростатичного потенціалу. Не існує точних аналітичних виразів для розрахунку розподілу індукції магнітного поля навіть для найпростішої системи, що володіє магнітним моментом – колового струму. У загальному випадку ця задача зводиться до розрахунку еліптичних інтегралів,

і лише для деяких симетричних точок простору можна розрахувати магнітну індукцію на основі простих аналітичних виразів. У багатьох наукових роботах для дослідження розподілу індукції магнітного поля постійних магнітів пропонуються різні методи розрахунку: кулонівський метод (метод уявних магнітних зарядів) (Ravaud, 2008; Rakotoarison, 2007), метод еквівалентного соленоїда (Derbya, 2010), метод розрахунку скалярного магнітного потенціалу (Samacho, 2013), а також різні числові методи розв'язку рівняння Лапласа для векторного або скалярного магнітного потенціалу (Прачуковська, 2015; Черкасова, 2014). Останнім методом виконуються числові розрахунки у професійних програмах ELCUT та COMSOL. Усі вказані методи зводять задачу до числового інтегрування.

Огляд літератури показує, що задача пошуку простих методів розрахунку сил взаємодії постійних магнітів різної форми залишається актуальною і сьогодні. У випадку однорідної намагніченості постійних циліндричних магнітів розрахунок розподілу магнітного поля та сили взаємодії між магнітами найпростіше виконувати методом віртуальних магнітних

зарядів, що рівномірно розподілені на основах циліндра. У такому випадку задача розрахунку розподілу напруженості магнітного поля, скалярного магнітного потенціалу та сили взаємодії між магнітами подібна до відповідної електростатичної задачі.

У даній роботі методом віртуальних магнітних зарядів отримано простий аналітичний вираз для індукції магнітного поля на осі кільцевого магніту, який дозволив розрахувати силу взаємодії кільцевого магніту з точковим магнітним диполем (ТМД). Виконано порівняння залежності сили взаємодії магнітів, отриманої в рамках моделі ТМД з результатами числових розрахунків, що враховують реальні розміри та форму циліндричних та кільцевих магнітів.

Числовим методом розраховано силову характеристику магнітної пружини, сила дії якої в робочій області не залежить від зміщення.

1. Розрахунок магнітного поля постійних магнітів

Рівняння Максвела для електростатичного та магнітостатичного полів у випадку відсутності струмів провідності можна спростити до такого вигляду

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0, \operatorname{rot} \vec{B} = 0, \operatorname{div} \vec{B} = 0, \operatorname{div} \vec{E} = \rho / (\epsilon \epsilon_0) \quad (1)$$

Для задоволення першого рівняння, достатньо напруженість електричного поля представити через градієнт деякої функції $\varphi(\vec{r})$ ($\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi(\vec{r})$). Функцію $\varphi(\vec{r})$ називають потенціалом електростатичного поля. Розрахунок розподілу напруженості електричного поля можна звести до знаходження скалярного потенціалу $\varphi(\vec{r})$.

Індукція магнітного поля зовні постійних магнітів при відсутності струмів провідності задовольняє таке ж рівняння як і напруженість електричного поля $\operatorname{rot} \vec{B} = 0$. Якщо вважати, що лінії індукції магнітного поля не замкнені, а починаються і закінчуються на різних полюсах магнітів, на яких розподілені віртуальні магнітні заряди, то аналогія з електростатикою буде очевидна. Тому для визначення індукції магнітного поля зовні постійних магнітів можна ввести скалярний потенціал (Fulrani, 2001). Знаходження скалярного потенціалу магнітного поля $\Phi(\vec{r})$ у багатьох випадках значно простіше, ніж знаходження векторної функції. Отже, розподіл індукції магнітного поля можна

розрахувати через градієнт від скалярного магнітного потенціалу $\vec{B} = -\vec{\nabla}\Phi(\vec{r})$.

Потенціал електричного диполя на великій відстані має вигляд

$$\varphi(r) = \frac{(\vec{d}\vec{r})}{r^3}, \quad (2)$$

де величину $\vec{d} = q\vec{l}$ називають дипольним моментом.

Напруженість електричного поля диполя при $r \gg l$

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\vec{\nabla} \frac{(\vec{d}\vec{r})}{r^3} = \frac{3(\vec{d}\vec{r})}{r^5} \vec{r} - \frac{\vec{d}}{r^3}. \quad (3)$$

Розподіл електричного поля диполя, що задається виразом (3), такий же, як і розподіл індукції магнітного поля магнітного диполя

$$\vec{B}(\vec{r}) = -\vec{\nabla} \frac{(\vec{P}_m \vec{r})}{r^3} = \frac{3(\vec{P}_m \vec{r})}{r^5} \vec{r} - \frac{\vec{P}_m}{r^3}, \quad (4)$$

де \vec{P}_m – магнітний момент магніту, який у випадку рівномірної намагніченості постійного магніту можна знайти через вектор намагніченості $\vec{M} = \vec{P}_m / V$. Така подібність електростатичного поля та поля постійних магнітів дозволяє використовувати формули електростатики при дослідженні магнітного поля постійних магнітів різних конфігурацій.

Наприклад, визначення магнітного поля, створеного однорідно намагніченим циліндром, подібне до визначення електричного поля однорідно поляризованого діелектричного циліндра. Відомо, що при однорідній поляризації в об'ємі циліндра відсутні об'ємні заряди. При аксіальній поляризації з'являються поверхневі зв'язані заряди протилежного знаку лише на основах циліндра. Величини їх поверхневих густин відрізняються лише знаком $\sigma = \sigma_+ = -\sigma_-$.

Густина поверхневих зарядів збігається з величиною нормальної складової вектора поляризації $\sigma = P_n$. Аналогічно величина вектора намагніченості однорідного циліндра дорівнює поверхневій густині уявних магнітних зарядів.

Формула (4) справедлива лише для моделі ТМД, тобто при виконанні умови $r \gg l$. При дослідженні силових характеристик магнітної пружини дана умова не виконується, тому виконаємо розрахунки магнітного поля, що створене уявними магнітними зарядами, що розподілені на основах циліндра з густиною $\sigma_m = M$. Якщо обмежитися лише аксіальною складовою

індукції магнітного поля на осі циліндричного магніта, то аналогічно до подібної електростатичної задачі отримуємо такий вираз:

$$B_z(z) = \frac{\mu_0 M}{2} \left(\frac{z+b}{\sqrt{a^2 + (z+b)^2}} - \frac{z-b}{\sqrt{a^2 + (z-b)^2}} \right). \quad (5)$$

Вираз (5), для зручності числових розрахунків, записаний в системі СІ. Початок координат поміщено у центр магніту довжиною $2b$ та радіусом a . У загальному випадку, для довільної точки $A(\rho, z)$ вирази для аксіальної та радіальної компонент містять подвійні інтеграли і не піддаються подальшому спрощенню

$$B_z(\rho, z) = \frac{\mu_0 M}{4\pi} \iint_0^{2\pi} \left(\frac{\frac{z+b}{\sqrt{(\rho^2 - 2\rho R \cos \phi + R^2 + (z+b)^2)^3}}}{\frac{z-b}{\sqrt{(\rho^2 - 2\rho R \cos \phi + R^2 + (z-b)^2)^3}}} \right) R dR d\phi, \quad (6)$$

$$B_\rho(\rho, z) = \frac{\mu_0 M}{4\pi} \iint_0^{2\pi} \left(\frac{\frac{\rho - R \cos \phi}{\sqrt{(\rho^2 - 2\rho R \cos \phi + R^2 + (z+b)^2)^3}}}{\frac{\rho - R \cos \phi}{\sqrt{(\rho^2 - 2\rho R \cos \phi + R^2 + (z-b)^2)^3}}} \right) R dR d\phi. \quad (7)$$

У граничному випадку $\rho = 0$ вираз (6) перетворюється до вигляду (5).

Для розрахунку магнітного поля кільцевого магніту (рис. 1) скористаємося принципом суперпозиції полів. За цим принципом, поле кільцевого магніту є сумою полів двох одновісних однорідно намагнічених протилежно напрямлених циліндричних магнітів радіусами R і r , що мають однакову довжину – $2b$.

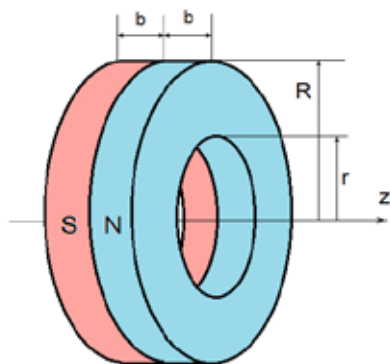


Рис. 1. Схема кільцевого магніту

З формули (5), отримуємо індукцію магнітного поля на осі кільцевого магніту

$$B_z(z) = \frac{\mu_0 M}{2} \left(\frac{\frac{z+b}{\sqrt{R^2 + (z+b)^2}} - \frac{z+b}{\sqrt{r^2 + (z+b)^2}}}{-\frac{z-b}{\sqrt{R^2 + (z-b)^2}} + \frac{z-b}{\sqrt{r^2 + (z-b)^2}}} \right). \quad (8)$$

Індукцію магнітного поля в точках, що не лежать на осі магніту можна отримати числовим розрахунком на основі виразів (6-7).

На рис. 3а) наведено залежність $B_z(z)$ при різних значеннях довжини магніту. З рис. 3а) видно, що при малих значеннях b залежність $B_z(z)$ містить три екстремальних точки. Збільшення величини b приводить спочатку до збільшення величини магнітного поля в центрі магніту, при $L=R$ магнітне поле досягає максимуму, а при подальшому збільшенні L центральний екстремум розділяється на два і величина магнітної індукції в центрі магніту зменшується. У середині магніту формується область, в якій магнітне поле мало залежить від аксіальної координати.

Вплив величини зовнішнього R та внутрішнього r радіусів кільцевого магніту на залежність $B_z(z)$ можна визначити з рис. 3б)-г). Дослідження показують, що збільшення R та зменшення r приводить до збільшення величини індукції магнітного поля у внутрішній області кільцевого магніту.

2. Розрахунок сили взаємодії магнітів

Розрахунок сили взаємодії аксіально намагнічених циліндричних магнітів є складною задачею, яку можна розв'язувати як числовими так і аналітичними методами (Pérez-Loya, 2014). Один з методів ґрунтується на методі еквівалентного соленоїда. При цьому величина лінійної густини струму, що уявно протікає по бічній поверхні постійного циліндричного магніту, дорівнює величині його намагніченості. Силу взаємодії постійних магнітів можна знайти, використовуючи закон Ампера.

$$d\vec{F} = I [d\vec{l} \vec{B}]. \quad (9)$$

Інший метод ґрунтується на подібності формул електростатики та магнітостатики, а також на потенціальності магнітного поля постійних магнітів у відсутності струмів провідності. Сила, що діє на елемент уявного магнітного заряду dq_m одного з магнітів у магнітному полі \vec{B} іншого магніту, розраховується на основі формули

$$d\vec{F} = dq_m \vec{B}, \quad (10)$$

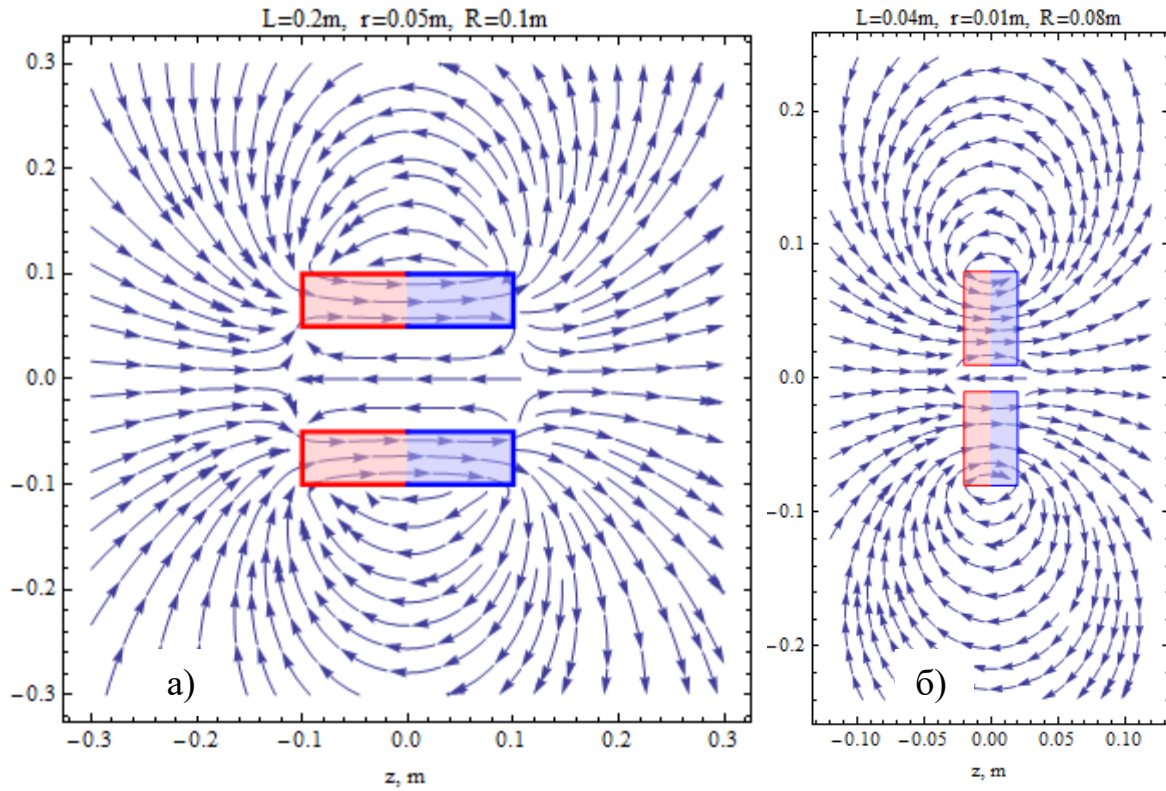


Рис. 2. Розподіл магнітного поля кільцевого магніту а) $R=10\text{см}$, $r=5\text{см}$, $L=2b=20\text{см}$; б) $R=8\text{см}$, $r=1\text{см}$, $L=2b=4\text{см}$

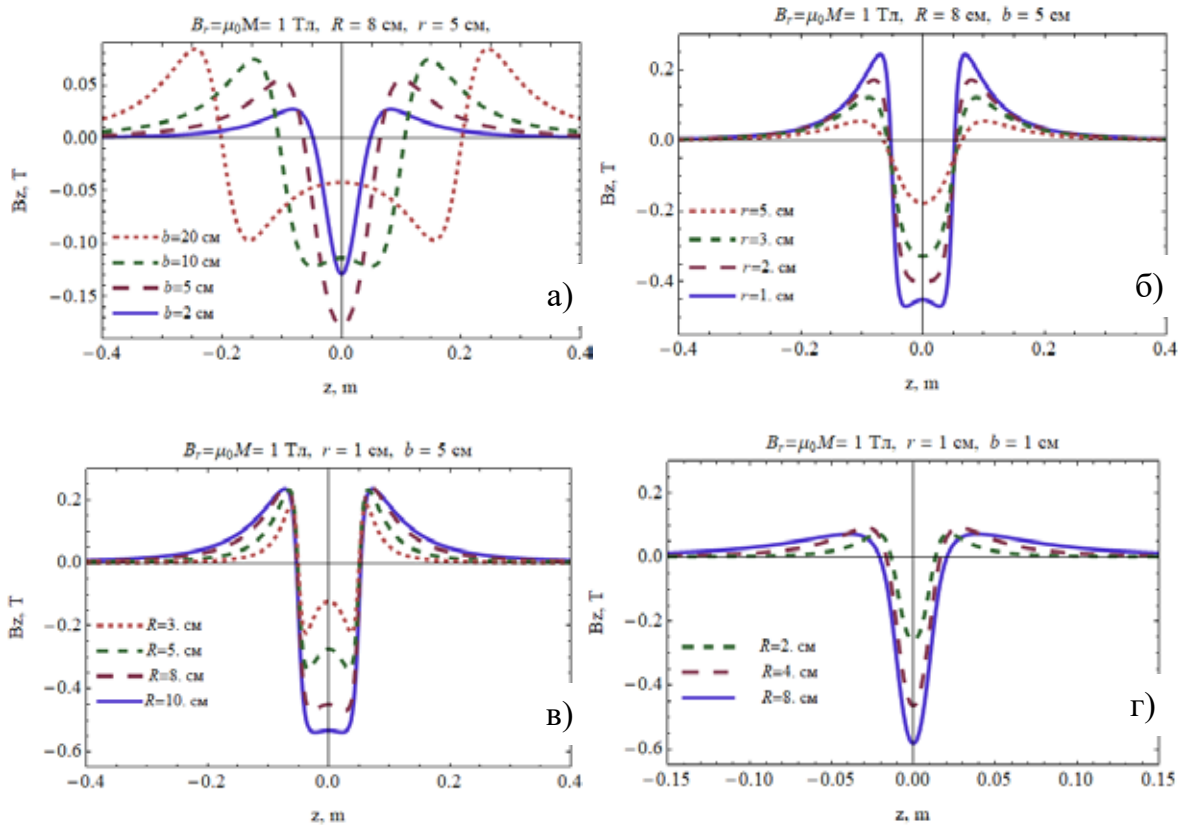


Рис. 3. Залежність індукції магнітного поля кільцевого магніту а) $R=8\text{см}$, $r=5\text{см}$, $b=2-20\text{см}$; б) $R=8\text{см}$, $b=5\text{см}$, $r=1-5\text{см}$; в) $r=1\text{см}$, $b=5\text{см}$, $R=3-10\text{см}$; г) $r=1\text{см}$, $b=1\text{см}$, $R=2-8\text{см}$

де \vec{B} – індукція магнітного поля в точці знаходження магнітного заряду dq_m . Якщо виразити індукцію магнітного поля \vec{B} через густину поверхневих магнітних зарядів другого магніту

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\sigma_m (\vec{r} - \vec{r}') dS}{(\vec{r} - \vec{r}')^3}, \quad (11)$$

то можна отримати закон взаємодії точкових поверхневих уявних магнітних зарядів

$$d\vec{F} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{dq_m dq'_m (\vec{r} - \vec{r}')}{(\vec{r} - \vec{r}')^3}, \quad (12)$$

або у вигляді подібному на закон Кулона для точкових електричних зарядів

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_{m1} q_{m2}}{r^2}. \quad (13)$$

Розрахуємо аксіальну складову сили взаємодії елементів заряду двох дисків радіусами R_1 та R_2 , що розташовані на відстані z один від одного і мають однакову густину уявних магнітних зарядів

$$dF_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{z \sigma_m^2 \rho_1 d\rho_1 d\phi_1 \rho_2 d\rho_2 d\phi_2}{[\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1 \rho_2 \cos(\phi_2 - \phi_1) + z^2]^{3/2}}. \quad (14)$$

Чотирикратний інтеграл, що отримується для розрахунку сили взаємодії двох полюсів магнітів, можна звести до подвійного

$$F = 2\mu_0 M^2 z \int_{\phi_1}^{R_1} \int_{\phi_2}^{R_2} \frac{E(4\rho_1 \rho_2 / (\rho_1^2 \rho_2^2 + z^2)) \rho_1 \rho_2 d\rho_1 d\rho_2}{((\rho_1 - \rho_2)^2 + z^2) \sqrt{(\rho_1 + \rho_2)^2 + z^2}}, \quad (15)$$

де $E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi} d\psi$ – повний еліптичний інтеграл.

Для розрахунку сили взаємодії між магнітами необхідно врахувати попарну взаємодію між усіма їх полюсами.

Для сили взаємодії великого кільцевого магніту з маленьким циліндричним магнітом, що розташовані на одній осі, можна отримати просту аналітичну формулу, використовуючи потенціальну енергію магнітного диполя у зовнішньому магнітному полі:

$$U = -(\vec{P}_m \vec{B}). \quad (16)$$

Тоді силу можна знайти зі співвідношення $F_z = -\partial U / \partial z$

$$F_z = P_m \frac{\partial B}{\partial z}. \quad (17)$$

З формули (17) слідує, що сила, яка переміщує магнітний диполь у просторі, відмінна від нуля тільки у випадку неоднорідного магнітного поля. Магнітний диполь з магнітним моментом, орієнтованим за магнітним полем втягується у область більшого магнітного поля, а якщо магнітний момент диполя протилежний полю, то він виштовхується з області сильнішого поля.

Величина похідної $\partial B / \partial z$ пропорційна радіальній компоненті індукції магнітного поля. Це впливає з того, що зменшення потоку ліній індукції в напрямку осі Oz пов'язана зі збільшенням потоку у радіальному напрямку, який пропорційний величині B_r . Отже, сила, яка переміщує магнітний диполь у аксіальному напрямку, більша там, де більша радіальна складова частина індукції магнітного поля.

Використовуючи вираз (8) для напруженості магнітного поля кільцевого магніту та формулу (17), визначимо силу, з якою магніт діє на точковий магнітний диполь P_m , що розташований на його осі. Розрахувавши похідну та спростивши вираз, отримаємо силу взаємодії у такому вигляді

$$F(z) = \frac{\mu_0 P_m M}{2} \left[\frac{R^2}{(R^2 + (z+b)^2)^{3/2}} - \frac{R^2}{(R^2 + (z-b)^2)^{3/2}} - \frac{r^2}{(r^2 + (z+b)^2)^{3/2}} + \frac{r^2}{(r^2 + (z-b)^2)^{3/2}} \right]. \quad (18)$$

На рис. 4а наведено залежність сили взаємодії ТМД з магнітним моментом $P_m = 1 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ ($\vec{P}_m \uparrow \downarrow Oz$) з кільцевим магнітом ($R = 6 \text{ см}, r = 2 \text{ см}, L = 2b$) при різних значеннях величини b . З рисунка видно, що при малих значеннях b ($b \leq 2 \text{ см}$) залежність $F(z)$ має вигляд непарної функції з чотирма екстремумами. Між двома внутрішніми екстремумами існує область лінійної залежності сили магнітної взаємодії $F(z) = -kz$. Ця сила подібна до сили пружності, яка повертає деформовану пружину до положення рівноваги. При $b > 2 \text{ см}$ у центрі з'являється область $F(z) = kz$ з малим значенням коефіцієнта k . З рис. 4б–4в) можна визначити вплив зовнішнього та внутрішнього радіусів кільцевого магніту на залежності сили $F(z)$, що діє на ТМД.

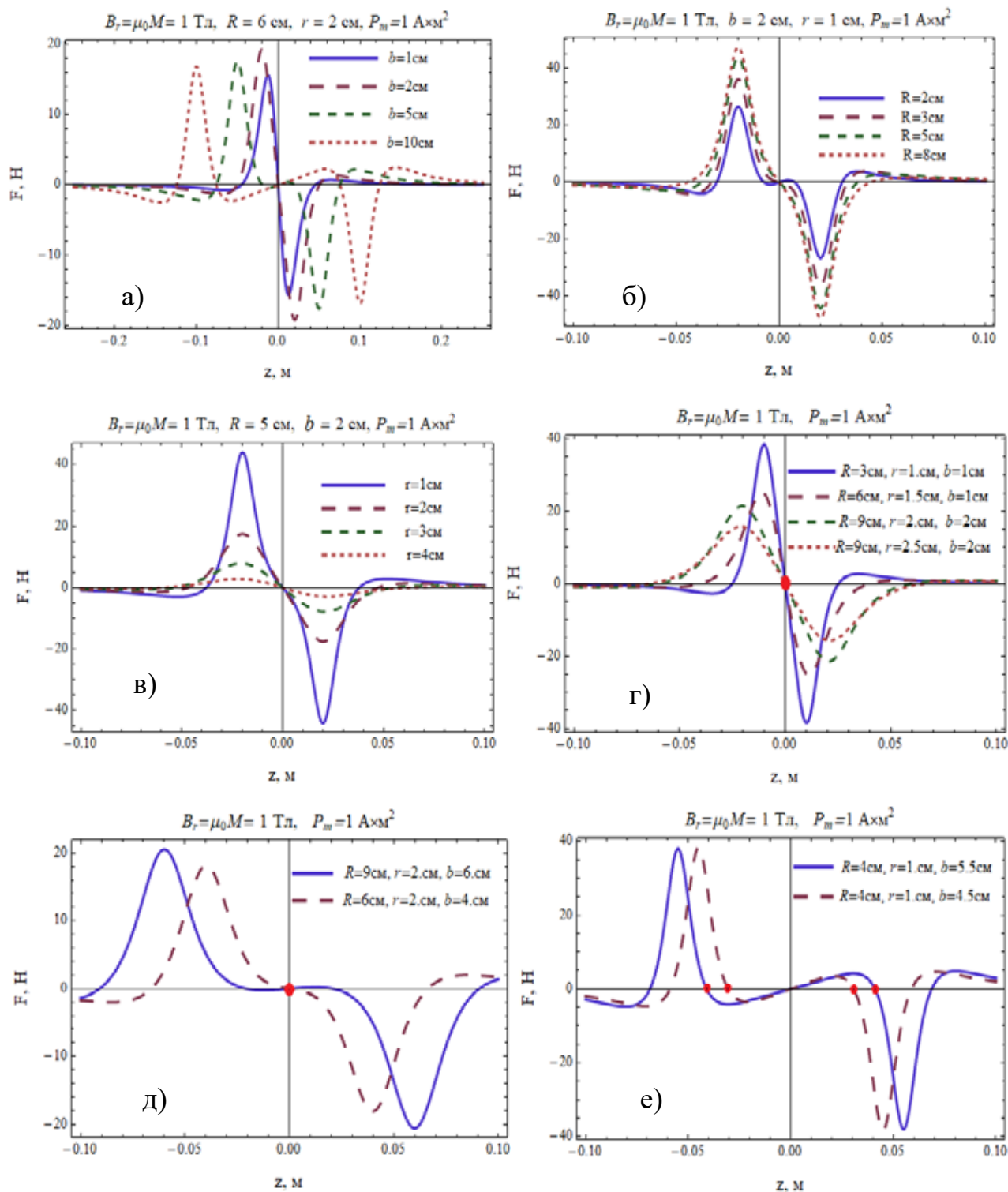


Рис. 4. Залежність сили взаємодії точкового магнітного диполя з кільцевим магнітом різних розмірів від відстані між їх центрами

При великих відстанях між магнітами $z > b \div 4b$ сила направлена вздовж осі Oz ($F > 0$), що відповідає відштовхуванню. Поблизу точки нульового поля сила змінює знак (область притягання).

Усі форми функції $F(z)$ можна розділити на три основні групи: 1) з лінійною залежністю сили у центральній області магніту (рис. 4г), при цьому існує одна точка стійкої рівноваги ($z=0$); 2) нелінійна залежність сили

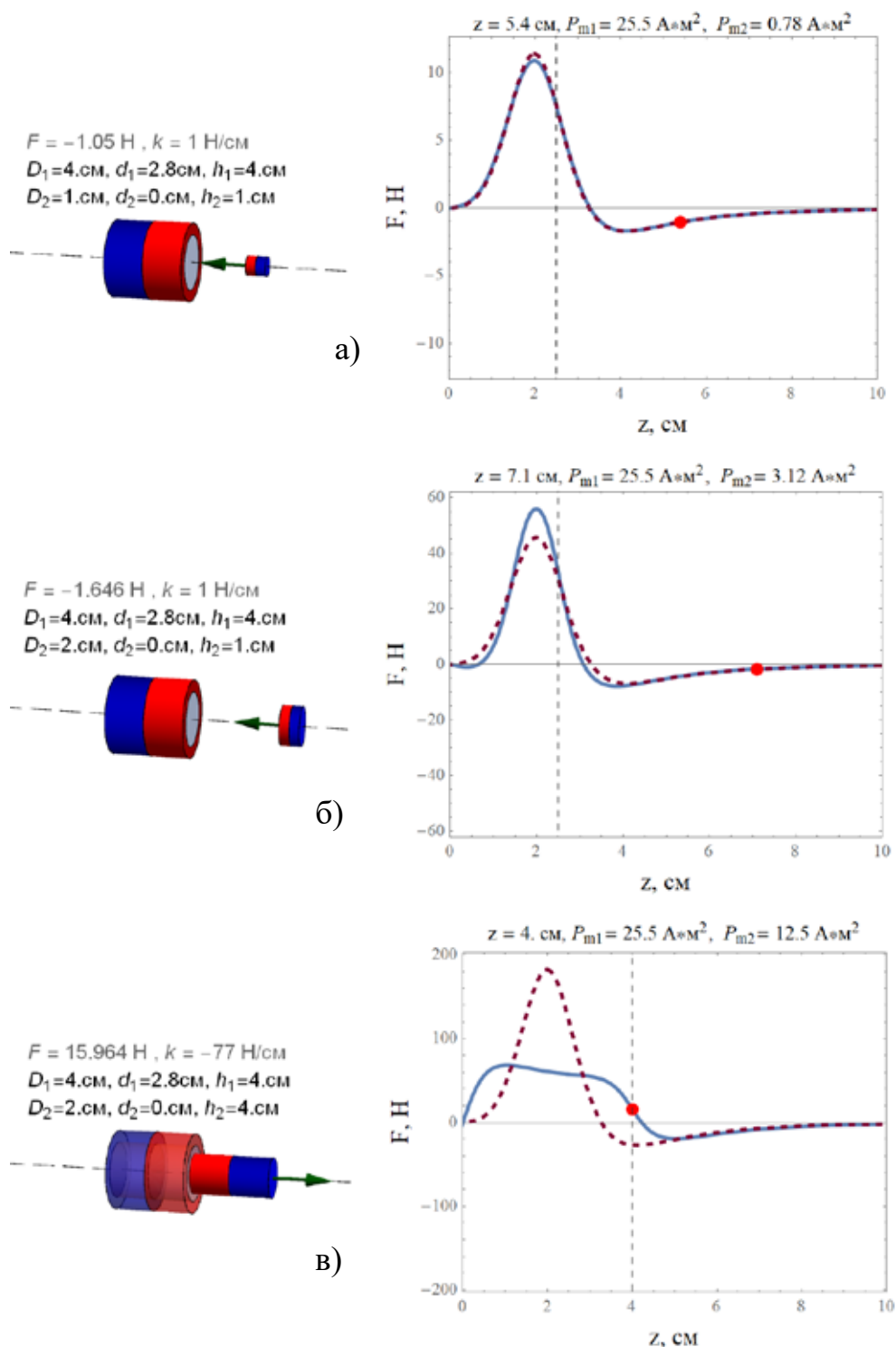


Рис. 5. Залежність сили взаємодії магнітів від відстані між їх центрами. Суцільна лінія – результат розрахунку за формулою (15); штрихова лінія – розрахунок за формулою (18) в рамках моделі ТМД

у центральній області магніту з однією точкою стійкої рівноваги. У граничному випадку з'являється область байдужої рівноваги (рис. 4д); 3) існування двох точок стійкої рівноваги та точки нестійкої рівноваги ($z=0$).

Величина $P_m = 1 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ відповідає циліндричному магніту з такими розмірами $r = 1 \text{ cm}, b = 2 \text{ mm}$ та однорідною намагніченістю $M = 1/4\pi \cdot 10^7 \text{ A/m}$ (залишкова індукція $B_r = \mu_0 M = 1 \text{ Tl}$).

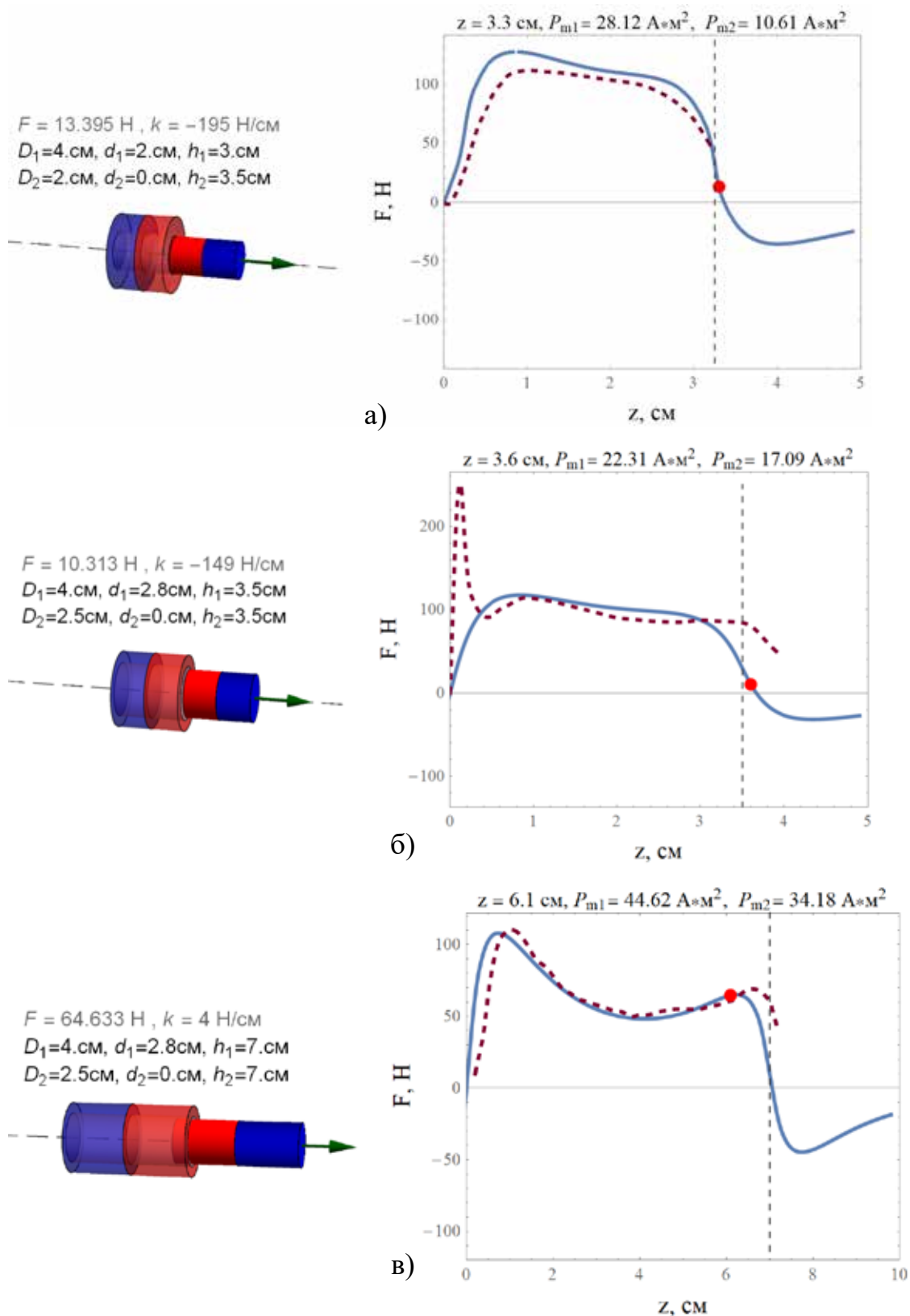


Рис. 6. Співставлення результатів теоретичних розрахунків (суцільна лінія) з експериментальними даними (штрихова лінія)

Усі отримані типи силових характеристик взаємодії магнітів можуть знайти практичне використання у різноманітних магніто-меха-

нічних пристроях, але вони справедливі лише при виконанні умов застосовності наближення ТМД. Щоб оцінити допустимі розміри магні-

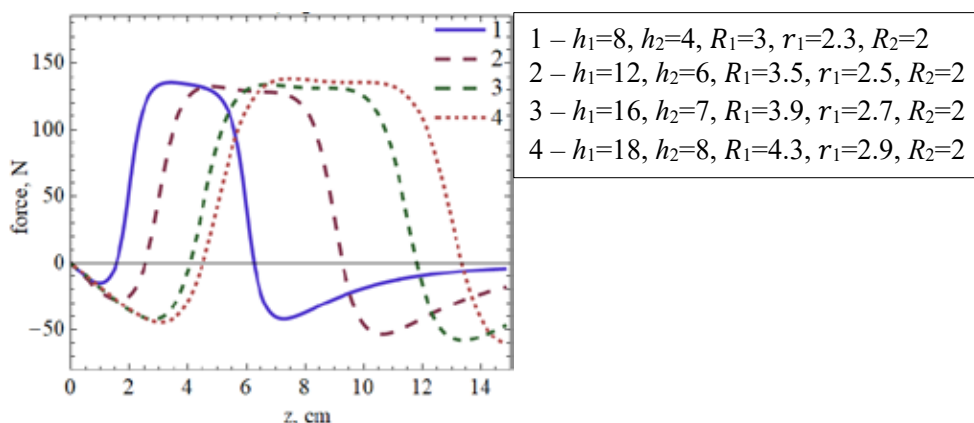


Рис. 7. Параметри і силові характеристики магнітних пружин з постійною силою та різною довжиною робочої області

тів, для яких такі умови виконуються на рис. 5, наведено залежності сили взаємодії магнітів різних розмірів, розраховані за формулою (18) в наближенні ТМД (штрихова лінія) та числовим інтегруванням за формулою (15) (суцільна лінія).

Як видно з рис. 5, аналітична формула (18) з непоганою точністю описує силу взаємодії великого кільцевого та малого циліндричного магнітів, що розташовані на одній осі. Точність погіршується при малих відстанях між магнітами у таких випадках: а) радіус циліндричного магніту близький до внутрішнього радіусу кільцевого магніту; б) довжини магнітів близькі між собою. При відстанях між магнітами, що перевищує їх розміри, аналітична формула достатньо точно описує силу взаємодії.

Отже, аналітичний вираз для сили взаємодії, отриманий в рамках моделі ТМД, можна використовувати при виконанні вказаних умов.

3. Співставлення теоретичних розрахунків з експериментальними даними

Для перевірки точності розрахунку силової характеристики взаємодії магнітів, які виконано числовим інтегруванням за формулою (15), співставимо їх з експериментальними даними, які наведено в роботах (Цивіліцин, 2013, 2014). У цих роботах описано експериментальні дослідження магнітної пружини з унікальною силовою характеристикою: у робочій області цієї пружини сила взаємодії магнітів не залежить від зміщення.

На рис. 6 наведено силові характеристики $F(z)$ для трьох різних магнітних пружин, що досліджені експериментально та відповідні

залежності, які розраховані за формулою (15) в рамках вищеприписаної теорії.

З рис. 6 видно, що результати числового розрахунку якісно та кількісно збігаються для магнітних пружин малих та великих розмірів. При довжині магнітної пружини 70мм яскраво проявляються максимуми, які майже точно збігаються з максимумами теоретично розрахованої кривої. Гострий пік експериментальної кривої, який спостерігається на рис. 6 б), не може бути обґрунтованим в рамках даної теорії. Для його пояснення необхідна більш детальна інформація про умови експерименту та характеристики магнітів, що використовувались.

Як виявилось, при великих розмірах магнітної пружини авторам експерименту не вдалося отримати силову характеристику з постійною силою. Тому за допомогою комп'ютерної моделі, що створена в рамках даного теоретичного дослідження, для покращення силової характеристики магнітної пружини вдалося підібрати такі розміри постійних магнітів, при яких сила втягування у робочій області не залежить від зміщення. Силові характеристики таких магнітних пружин наведено на рис. 7.

ВИСНОВКИ

Методом уявних магнітних зарядів отримано аналітичні вирази для розподілу індукції магнітного поля вздовж осі кільцевого магніту та розрахунку сили взаємодії його з точковим магнітним диполем.

Встановлено межі застосовності аналітичного виразу для розрахунку сили взаємодії кільцевого та циліндричного магнітів шляхом порівняння з результатами числового розра-

хунку сили взаємодії магнітів довільних розмірів. Створено та опубліковано на сайті Wolfram Demonstration Project комп'ютерні демонстрації, які дозволяють розрахувати розподіл магнітного поля та силу взаємодії кільцевих та циліндричних магнітів різних розмірів.

Результати теоретичних розрахунків добре узгоджуються із серією відомих експериментальних даних, отриманих під час дослідження

магнітної пружини, сила втягування якої не залежить від зміщення. За допомогою комп'ютерних моделей вдалося підібрати оптимальні розміри магнітів для удосконалення магнітної пружини.

Комп'ютерна програма, що створена в рамках цієї роботи, дозволяє визначити характерні розміри магнітів для отримання заданих силових характеристик магнітної пружини.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ravaud R., Lemarquand G., Lemarquand V., Depollier C. Analytical Calculation of the Magnetic Field Created by Permanent-Magnet Rings. *IEEE Transactions On Magnetism*. 2008. Vol. 44. № 8. P. 1982–1989.
2. Rakotoarison H., Yonnet J., Delinchant B. Using coulombian approach for modelling scalar potential and magnetic field of a permanent magnet with radial polarization. *IEEE Transactions On Magnetism*. 2007. Vol. 43. № 4. P. 1261–1264.
3. Derby N., Olbert S. Cylindrical magnets and ideal solenoids. *Am. J. Phys.* 2010. Vol. 78. № 3. P. 229–235.
4. Camacho J., Sosaa V. Alternative method to calculate the magnetic field of permanent magnets with azimuthal symmetry. *Revista Mexicana de Fisica E*. 2013. Vol. 59. P. 8–17.
5. Прачуковська А., Новицькі М., Коробийчук І., Шевчик Р., Салах Я. Моделирование и верификация распределения магнитного поля постоянных магнитов. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. Т. 6/5. № 78. С. 4–11.
6. Черкасова О.А. Исследование магнитного поля постоянного магнита с помощью компьютерного моделирования. *Гетеромагнитная электроника*. 2014. № 17. С. 112–120.
7. Fulrani P. Permanent Magnet and electromechanical devices. *Academic press*. 2001.
8. P'erez-Loya J., Lundin U. Optimization of Force Between Cylindrical Permanent Magnets. *IEEE Magnetism Letters*. 2014. Vol. 5. P. 0800404.
9. Цивіліцин В.Ю., Мільман Ю.В., Гончарук В.А., Бондар І.Б., Створення магнітних пружин із заданою силовою характеристикою. *Доповіді Національної академії наук України*. 2013. № 3. С. 90–94.
10. Цивіліцин В.Ю., Мільман Ю.В., Гончарук В.А., Бондар І.Б. Розрахунок та експериментальне дослідження сили втягування магнітних пружин двох типів. *Український фізичний журнал*. 2014. Т. 59. № 10. С. 1022–1027.
11. Цивіліцин В.Ю. *Патент на корисну модель* UA 83233 U заявка u201304109 від 02.04.201 опубл. 27.08.2013.
12. Holovatsky V., Holovatska Y. Interacting Cylindrical Magnets. Wolfram demonstration project. URL: <https://demonstrations.wolfram.com/InteractingCylindricalMagnets/>.
13. Holovatsky V., Holovatska Y. Magnetic field of a hollow cylindrical magnet. Wolfram demonstration project. URL: <https://demonstrations.wolfram.com/MagneticFieldOfAHollowCylindricalMagnet/>.

REFERENCES:

1. Ravaud R., Lemarquand G., Lemarquand V., Depollier C. Analytical Calculation of the Magnetic Field Created by Permanent-Magnet Rings. *IEEE Transactions On Magnetism*. 2008. Vol. 44. № 8. P. 1982–1989.
2. Rakotoarison H., Yonnet J., Delinchant B. Using coulombian approach for modelling scalar potential and magnetic field of a permanent magnet with radial polarization. *IEEE Transactions On Magnetism*. 2007. Vol. 43. № 4. P. 1261–1264.
3. Derby N., Olbert S. Cylindrical magnets and ideal solenoids. *Am. J. Phys.* 2010. Vol. 78. № 3. P. 229–235.
4. Camacho J., Sosaa V. Alternative method to calculate the magnetic field of permanent magnets with azimuthal symmetry. *Revista Mexicana de Fisica E*. 2013. Vol. 59. P.8–17.
5. Prachukovska A., Novitski M., Koribiychuk I., Shevchyk R., Salah Y., Modeling and verification of the distribution of the magnetic field of permanent magnets. *Eastern European Journal of Advanced Technologies*. 2015. Vol. 6/5. № 78, P. 4–11.
6. Cherkasova O.A. Study of the magnetic field of a permanent magnet using computer simulation. – *Heteromagnetic electronics*. – 2014. – № 17, С. 112-120.
7. Fulrani P. Permanent Magnet and electromechanical devices, *Academic press*, 2001.
8. P'erez-Loya J., Lundin U. Optimization of Force Between Cylindrical Permanent Magnets. - *IEEE Magnetism Letters*. – 2014. - V.5, P. 0800404.
9. Tsvilitsin V.Yu., Milman Yu.V., Goncharuk V.A., Bondar I. B., The creation of magnetic springs from a given power characteristic. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine. – 2013. - № 3, P.90-94.

10. Tsivilitsin V.Yu., Milman Yu.V., Goncharuk V.A., Bondar I. B., Rozrahunok, that experimental study of the retraction force of magnetic springs of two types. – UJP. - 2014. V. 59, № 10, P.1022-1027.
11. Tsivilitsin V.Yu., Patent for useful model UA 83233 U application u201304109 02.04.201 publish. 27.08.2013.
12. Holovatsky V., Holovatska Y. Interacting Cylindrical Magnets. Wolfram demonstration project URL: [https://demonstrations.wolfram.com/ InteractingCylindricalMagnets/](https://demonstrations.wolfram.com/InteractingCylindricalMagnets/).
13. Holovatsky V., Holovatska Y. Magnetic field of a hollow cylindrical magnet. Wolfram demonstration project URL: [https://demonstrations.wolfram.com/ MagneticFieldOfAHollowCylindricalMagnet/](https://demonstrations.wolfram.com/MagneticFieldOfAHollowCylindricalMagnet/).

УДК 37.016:53]+[37.015.31:159.955-028.43

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-2>

Микола ГОЛОВІН

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та кібербезпеки, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0003-4516-4677

Ніна ГОЛОВІНА

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0002-1152-1536

Бібліографічний опис статті: Головін, М., Головіна, Н. (2022). Механізми критичного мислення та навчання фізики і програмування. *Фізика та освітні технології*, 1, 15–26, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-2>

МЕХАНІЗМИ КРИТИЧНОГО МИСЛЕННЯ ТА НАВЧАННЯ ФІЗИКИ І ПРОГРАМУВАННЯ

Метою цієї роботи є виявлення та формалізація механізму критичного мислення, що проявляється в процесі навчання фізики та програмування. Цей механізм подається у термінах формальної логіки, де окремі кроки представляються у вигляді аналізу, синтезу, індукції, дедукції, абстрагування, узагальнення, конкретизації. Ця задача є актуальною як із психологічної, так і з методико-педагогічної точок зору, адже далеко не кожний пласт навчальних дисциплін, особливо в гуманітарній сфері, добре проявляє протокол критичного мислення. Програмування через високу формалізацію матеріалу є тією діяльністю, де механізм критичного мислення проявляється контрастно.

Важливим моментом є також і вибір задачі на основі розв'язку якої ілюструється механізм критичного мислення. Це задача моделювання руху тіла в полі тяжіння з класичної механіки, яка має добру візуалізацію, є достатньо лаконічною та має просте математичне підґрунтя.

Методологія дослідження рефлексії критичного мислення реалізовувалась у процесі моделювання цього процесу в його еволюційному розвитку. Новизна роботи полягає в тому, що критичне мислення тут представлено у вигляді характерних циклічностей формально-логічних і матеріалізованих дій. Інше новаторство полягає у представленні результатів роботи механізму критичного мислення. Ці результати фіксувались у вигляді віртуальних ментальних когнітивних структур, що мають еволюцію в пізнавальному процесі. Такий підхід напряму зв'язаний з процесами та методами навчання і тому є цікавим в сенсі теорії навчання.

Основним висновком роботи є те, що запропонований підхід дозволив розглянути критичне мислення лаконічно в контексті трьох циклічно діючих ментальних схем, що базуються на конкретизації, узагальненні та симульованому аналізі і синтезі. Останнє робить ці схеми хорошим базисом для розвитку різноманітних методик навчання особливо в природничій царині.

Ключові слова: методика навчання, формальна логіка, пізнавальні схеми, рефлексія, моделювання.

Mykola HOLOVIN

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Computer Science and Cybersecurity, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0003-4516-4677

Nina HOLOVINA

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0002-1152-1536

To cite this article: Holovin, M., Holovina, N. (2022). Mekhanizmy krytychnoho myslennia ta navchannia fizyky i prohramuvannia [Mechanisms of critical thinking and learning physics and programming]. *Physics and Educational Technology*, 1, 15–26, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-2>

MECHANISMS OF CRITICAL THINKING AND LEARNING PHYSICS AND PROGRAMMING

The purpose of this work is to identify and formalize the mechanism of critical thinking that manifests itself in the process of teaching physics and programming. This mechanism is presented in terms of formal logic, where individual steps are presented in the form of analysis, synthesis, induction, deduction, abstraction, generalization, and specification. This task is relevant from a psychological, methodological, and pedagogical point of view, because not every layer of educational discipline, especially in the humanitarian field, demonstrates the protocol of critical thinking well. Due to the high formalization of the material, programming is the activity where the mechanism of critical thinking manifests itself very distinctively.

An important point is also the choice of a problem, whose solution illustrates the mechanism of critical thinking. This is a problem of modeling the movement of a body in a gravitational field from classical mechanics, which has a good visualization, is quite concise, and has a simple mathematical basis.

The research methodology of critical thinking reflection was implemented in the process of modeling this process in its evolutionary development. The novelty of the work is that critical thinking is presented here in the form of common cycles of formal logical and materialized actions. Another innovation is the presentation of the results of the critical thinking mechanism. These results were recorded in the form of virtual mental cognitive structures that have an evolution in the cognitive process. This approach is directly related to learning processes and methods and is therefore interesting in the sense of learning theory.

The main conclusion of the work is that the proposed approach made it possible to consider critical thinking succinctly in the context of three cyclical mental schemes based on concretization, generalization, and simultaneous analysis and synthesis. The latter makes these schemes a good basis for the development of various teaching methods, especially in the field of natural sciences.

Key words: teaching method, formal logic, cognitive schemes, reflection, modeling.

Актуальність проблеми. Сучасний світ, науково-технічна революція, глобалізація інформаційного простору, суттєве ускладнення соціальних конструкцій та відповідно відносин між людьми, маніпуляції масовою свідомістю вимагають від кожної людини складніших реакцій на виклики оточуючого світу, ніж зовсім у недавньому минулому. Новітній рівень техніки та технологій, що проникають в усі сфери життя, в тому числі у професійне, вимагають відповідної освіти, знань, умінь і навичок, як із експлуатації, так і зі створення та ремонту відповідних складних штучних пристроїв. Останнє передбачає високий рівень знань, зокрема, з фізики, математики, інформатики, хімії, біології, медицини та ін. Складні уявлення про природу, про технічні пристрої вимагають від людини складного причинно-наслідкового, абстрактно-логічного, критичного мислення, як у професійній сфері, так і у повсякденному житті. Сам термін «критичне мислення» започаткований філософом Дж. Дьюї, який найчастіше використовував його як «рефлексивне мислення», маючи на увазі активний, послідовний і обережний розгляд будь-якого переконання або передбачува-

ної форми знання у світлі підстав, які його підтримують (Дьюї, 2021).

Тенденція укрупнення соціальних конструкцій в сучасних умовах приводить до їх ускладнення. Глобалізація сучасного світу в інформаційному, технічному, соціальному, політичному проявах вимагає ускладнення мислення у відповідних модальностях. Тому успішна життєдіяльність в усіх її проявах у глобалізованому складному світі вимагає розуміння багатьох абстракцій, критичного, причинно-наслідкового мислення. На ускладнення життєдіяльності з укрупненням соціальних конструкцій звернули увагу ще на початку двадцятого століття. Так, у Сполучених штатах Америки, де бурхливо розвивалась промисловість і куди прибували людські потоки з країн із архаїчним укладом життя, було помічено, що ті, хто не міг пристосуватися до нових умов життя, не могли впоратися з новими складними проблемами, ставали легкою здобиччю різноманітних шахраїв. Тоді в Америці серйозно поставилися до цього і почали шукати нові підходи до освіти своїх громадян.

Критичний тип мислення проявляється при розв'язанні широкого кола сучасних задач від складних наукових, технологічних до соціаль-

них, економічних і навіть побутових. Критичне мислення стосовно складної проблеми має базуватись на широкій, добре структурованій інформаційній науковій базі. Предтечею критичного мислення було пралогічне мислення. Таке мислення було розповсюджене скрізь у первісному світі наших предків мисливців, збирачів, риболовів, землеробів, що користувались у своєму побуті елементарними знаряддями і технологіями (Леви-Брюль, 2002). Пралогічне мислення базується на збідненій, клаптиковій структурі знань. У сучасному світі пралогічне мислення характерне для дітей, малоосвічених людей та людей, які внаслідок свого архаїчного укладу життя інтелектуально деградували. Деградація може бути пов'язана з хворобами та віковими процесами.

У пралогічному мисленні явища, які насправді не є зв'язаними, можуть співвідноситись за ознакою «причина – наслідок» у випадках, коли вони збігаються у просторі та часі. Партиципация (причетність) подій, суміжних у часі та просторі, служить у пралогічному мисленні основою пояснення більшості подій, що відбуваються в навколишньому світі. Породженням такого мислення є віра в магію. Зрозуміло, що партиципация породжує короткі ланцюги логічних висновків, контрастне чорно-біле мислення, опору на емоції (Павловська, 2021). Дитяче пралогічне мислення є етапом розвитку мислення, яке надалі може еволюціонувати у критичне або догматичне мислення.

Догматичне мислення, яке сформувалось ще в стародавні часи, має своїх численних носіїв і зараз. Цей тип мислення базується на інформаційній базі, що почерпнута зі стародавніх книг, інколи вражає складними логічними і псевдологічними пасажами, які намагаються звести всі прояви сучасного життя до стислому списку догм сумнівної істинності (Фромм, 2014).

Критичне мислення, на відміну від пралогічного, є причинно-наслідковим, абстрактно-логічним, базується на широкій сучасній, матеріалістичній, добре структурованій базі знань, передбачає в процесі свого функціонування постійно діючі зворотні зв'язки верифікації правильності суджень. Ці верифікації можуть реалізуватись як різноманітними матеріалізованими діями (експерименти), так ментальними, які базуються на строгих наукових теоретичних

викладках, наприклад, у теоретичній фізиці або математиці при доведенні теорем.

Критичне мислення стосовно складної проблеми є багатокроковим. Ланцюг критичних розумових висновків, що мають на меті розв'язати складну проблему, реалізують ментальні дії на різних рівнях її конкретизації. Тобто критичне мислення стосовно складної проблеми завжди абстрактно-логічне з широким діапазоном переходів у напрямку конкретне-загального та загальне-конкретного. Розв'язування проблем у природничих дисциплінах, як правило, спирається на структуру знань ієрархічного типу. І це зрозуміло. Адже пересування ієрархічною деревоподібною конструкцією легко представити у вигляді абстрактно-логічних дій. Існують і інші види структури знань: мережі, послідовності, кластери, простори, тощо (Андерсон, 2002).

Важливою рисою критичного мислення є його *рефлексивність*. Рефлексивність передбачає *усвідомлення та контроль* своїх ментальних дій (Леонтьєв, 2011). Самоконтроль сутності логічних дій захищає від небезпеки хибного логічного кроку на якомусь з етапів логічних роздумів. Прикладом такої псевдологічної дії може бути, зокрема, трансдукція, коли трансдуктивні умовиводи здійснюються на підставі схожості, відмінності або за аналогією.

Існує багато випадків, коли виникають так звані когнітивні пастки, у які люди досить часто попадають при недостатній рефлексії мислення (Кукла, 2008). Цих пасток доволі багато (десятки), вони типізовані, систематизовані. Грубо ці когнітивні пастки можуть бути представлені у вигляді чотирьох категорій: «Коли багато інформації» і виникає проблема надлишку інформації; «Коли не вистачає сенсу» і складно зрозуміти суть проблеми; «Коли швидко реагуємо» і не вистачає часу для рефлексії; «Коли запам'ятовуємо і згадуємо» тобто реалізується викривлення на межі того, що запам'ятовується і забувається. Когнітивні пастки, як правило, легко виявляються рефлексією, тобто під час аналізу автоматичних думок.

Обґрунтованість і контрольованість ментальних дій має надзвичайно велике значення, адже навіть одна помилка в ланцюгу правильних ментальних дій може зруйнувати всю конструкцію, і проблема, що має долатись критичним мисленням, не буде розв'язана, а саме мислення пере-

стане бути критичним. Дослідники, як правило, розглядають властивості, параметри, ознаки критичного мислення (Терно, 2009), однак тема механізму критичного мислення залишається нерозглянутою. Хоча, як зауважено в (Канеман, 2017), зафіксовано систематичні помилки у мисленні нормальних людей та відстежено, що вони закорінені насамперед у самому механізмі мислення і меншою мірою зумовлені руйнівним впливом емоцій на мислення.

Актуальною проблемою, що потребує дослідження, є задача виявлення та формалізації механізму критичного мислення. Не всякий пласт сучасних задач добре проявляє протокол критичного мислення. У цій роботі пропонується звернути увагу на те, що механізм критичного мислення можна описати мовою формальної логіки, де окремі кроки представляються у вигляді аналізу, синтезу, індукції, дедукції, абстрагування, узагальнення, конкретизації. Саме такий підхід мав би дати можливість розкрити механізм критичного мислення. Інша сторона – проблематика, на якій візуалізується механізм. Програмування через високу формалізацію матеріалу є тією діяльністю, де протокол критичного мислення проявляється контрастно і є видимим неозброєним оком. Важливою цінною особливістю такого підходу є той факт, що програмування відстороненого об'єкту, зокрема обчислювальної машини, є переносом на цей об'єкт технологій програмування себе самого. Зрозуміло, що цікавий і зворотний шлях, щоб через розуміння планування діяльності комп'ютера, тобто його програмування, навчитися вдосконалювати та оптимізувати власну рефлексію.

Важливим моментом є також і вибір задачі, стосовно якої відбувається критичне мислення. Ця задача має мати добру візуалізацію, бути лаконічною, мати достатню складність. Цим вимогам задовольняють модельні процеси класичної фізики. Вони мають хорошу математичну основу. Моделювання цих процесів може дати хороше лаконічне формулювання задачі, відслідковування процесу в реальному часі і масштабі та верифікацію результату. Крім цього, важливим є те, що обмірковування процесів відбувається не тільки через призму програмування, а ще в і контексті сутності самого фізичного процесу. Останнє теж вимагає критичності, але тепер вже в галузі фізики.

Метою цієї роботи є виявлення та демонстрація механізму протоколу критичного мислення на прикладі навчального програмування моделі фізичного процесу із застосуванням уявлень когнітивної психології про пізнавальні схеми, формально логічні методи мислення.

Завдання

1. Розгляд простої навчальної задачі комп'ютерного моделювання фізичного процесу як базисної для аналізу процесів критичного мислення.

2. Виявлення та формалізація механізму протоколу критичного мислення на прикладі програмування моделі.

3. Формування концептуальних підходів стосовно рефлексії критичного мислення.

Теоретичні основи дослідження. Застосуємо для опису феномену критичності мислення теорію та термінологію формальної логіки і представимо процес через такі пізнавальні дії, як: аналіз, синтез, дедукція, індукція, абстрагування, узагальнення, конкретизація. Крім цього, застосуємо при обговоренні такі популярні в когнітивній психології віртуальні конструкції, як ментальні пізнавальні схеми та структури.

Методи дослідження. У дослідженнях механізму критичного мислення і рефлексивних процесів, що супроводжують цей процес, використаємо метод моделювання. Моделювання механізму критичного мислення будемо здійснювати в термінах строгої формальної логіки на прикладі розв'язування конкретної задачі з програмування. Опис процесу еволюції розв'язку задачі дозволить уникнути необґрунтованих фантазій у моделюванні ментальних процесів. Результат роботи механізму критичного мислення будемо зображати віртуальними ментальними пізнавальними структурами, які представлені у вигляді абстрактних графічних схем. Останні зображать різні етапи еволюції цієї пізнавальної структури. Тобто використаємо метод віртуалізації і будемо зображати ментальні процеси графічно. Крім цього, в роботі реалізується еволюційний підхід до формування ментальних конструкцій. Цей підхід напряду зв'язаний із процесами навчання та методами навчання. Адже відслідковування еволюції формування окремої пізнавальної схеми окремого учня в різних умовах дає можли-

вість обговорювати методи навчання на теоретичному рівні.

Виклад основного матеріалу дослідження.
Розгляд простої навчальної задачі комп'ютерного моделювання фізичного процесу. Розглянемо особливості прояву феномену критичності мислення в процесі виконання навчального завдання на модернізацію та відлагодження невеликої програми, що містить моделювання простого фізичного процесу. Нехай модернізація, що вимагається в завданні, буде така, що її можна здійснити невеликим фрагментом програми. Цей фрагмент може бути досягнутий за один сеанс зосередження уваги. Нагадаємо, що один сеанс концентрації уваги може охопити не більше 7 ± 2 компоненти мислення (Miller, 1956, р.81–97) (Магічне число Міллера).

Ілюстраційне завдання полягає в тому, що в готовому коді програми на мові Python, яка моделює рух падіння тіла в полі тяжіння, необхідно реалізувати відбивання цього тіла від перешкоди. Нижче представлений текст програми, що є результатом виконання завдання.

```
import turtle as tl # під'єднання функцій бібліотеки turtle
tl.shape("circle");tl.ht();tl.up() # фізичне тіло куля; він прозорий; підняти ручку
tl.setpos(-100,-100);tl.down();tl.setpos(100,-100);tl.up(); # малювати лінію землі
Yp=90;Yzm=-90;X=0;t=0;Vy=0;g=10;dt=0.01;
Y=Yp # початкові параметри
tl.setpos(X,Y);tl.st() # фізичне тіло в початковому положенні і воно видиме
# ---- Динаміка модельного експерименту ----
while 1: # цикл з передумовою, що контролює весь модельний експеримент
    t+=dt # Приріст часу t на dt
```

```
# ----- Відбивання від землі -----
if(Y<Yzm): # Якщо тіло досягнуло рівня землі (Y<Yzm) то:
    Vy=-g*t-Vy # Обчислення швидкості після відбиття від поверхні
    Yp=Yzm # Нове значення початкової координати
    t=0 # Обнуління часу в момент відбиття
# -----кінець відбивання-----
Y=Yp-(Vy*t)-(g*(t)**2/2); # Обчислення поточного Y
tl.setpos(X,Y) # Перемістити тіло в точку (X,Y)
```

Зрозуміло, що на початку виконання відсутній фрагмент програми, який відповідальний за відбивання: $if(Y < Yzm): Vy = -g \cdot t - Vy; Yp = Yzm; t = 0$. Саме цей фрагмент має бути дописаний та відлагоджений в ході виконання завдання.

Текст програми структурований. Структура реалізована зміщенням праворуч блоків програми відносно рядків, що ними керують. Так формується ієрархічна конструкція, що може мати багато рівнів вкладеності. Адже в кожному блоку у тілі програми може бути вкладено інший блок або кілька.

На рис. 1 представлено умовне графічне зображення ментальної конструкції базової програми, тобто програми на початку розв'язування завдання ліворуч (1) і, відповідно, після його завершення – праворуч (2).

Кожен трикутник на рис. 1 окреслює логічно завершені сукупності кроків розв'язку задачі, що одночасно перебувають в полі уваги учня. Такі логічно завершені сукупності кроків надалі будемо називати конструктами. Позначення в трикутнику уваги (конструкті) розуміються наступним чином. Рядок кружечків



Рис. 1. Початкова (1) і кінцева (2) ментальна конструкція розв'язку задачі

у основі трикутника є деталізацією більш загальної події, що позначається кружечком у вершині трикутника над рядком. Зрозуміло, що переключення поля уваги між конструктами, що знаходяться один над одним, відбуваються через спільний для двох трикутників компонент. Видно, що такий механізм добре візуалізує дедуктивні абстрактно-логічні дії – структурою вниз і відповідно індуктивні дії – структурою вверх.

Повернемося до конкретики, що зображена на рис. 1.1. Так верхній трикутник окреслює початкові кроки, які необхідно реалізувати для здійснення динамічної частини модельного експерименту: під'єднання бібліотеки turtle; опис вигляду тіла як кулі; малювання лінії землі; ввід початкових параметрів експерименту. Під ним є конструкт, що циклічно реалізує динамічну частину експерименту, а саме: обчислення координат тіла, що рухається в полі тяжіння; вивід на екран зображення рухомої кульки.

На рис. 1.2 під конструктом, що реалізує динаміку руху кульки, зображений додатковий конструкт, відповідальний за її відбивання. Тобто на рис. 1.1 зображена початкова фаза в розв'язуванні завдання без цього додаткового конструкту, а на рис. 1.2 – кінцева, де додатковий конструкт вже є. Для простоти, окремими кроками (кружечками), будемо вважати текстові фрагменти коду, розташовані в окремих рядках. Тобто між станом, зображеним на рис. 1.1 та на рис. 1.2, має відбутись феномен креативного мислення, що відбувається в межах ментальної критичності. Останнє, очевидно, відрізняє цю креативність від креативності гуманітарної сфери, де креативність часто не комунікує з критичністю і матеріалістичністю, а відбувається в модальності художніх фантазій.

Виявлення та формалізація механізму протоколу критичного мислення. Ментальні та матеріалізовані дії в ході процесу розв'язування завдання на модернізацію програми можна представити такими трьома фазами.

1. **Критичне мислення** для актуалізації коду базової програми, що потребує модернізації за умовою задачі.

2. **Критичне обмірковування** нового програмного блоку в процесі його утворення. Цей блок і є модернізацією програми. Ці дії можна ще назвати **креативними**.

3. **Критичне мислення** в процесі відлагодження коду програми.

Критичне мислення впродовж актуалізації коду базової програми, що має модернізуватись в процесі виконання завдання. Тут ключовим є питання: чи виконує ця програма функції, заявлені в умові завдання – рух тіла в полі тяжіння? **Активний експеримент** у ході матеріалізованих дій із випробовуванням програмного коду стартової програми має дати відповідь на питання дієздатності коду стартової програми. Ця відповідь може бути отримана після її запуску. Тому першим кроком у розв'язуванні поставленого вище завдання є запуск програми та її перевірка на дієздатність. Саме **дія** програми та **сприйняття** результатів її роботи дає найбільш узагальнену інформацію (**конкретний досвід**) стосовно функцій програми, як цілісного об'єкту. Дії з перевірки дієздатності програми є проявом критичного мислення на цьому етапі вирішення проблеми.

Далі постає завдання, по-перше, пошуку, куди вносити зміни, а по-друге – які. Необхідна **актуалізація пізнавальної ментальної схеми** програми, що має піддаватись модернізації згідно із завданням. Ментальні дії із формування пізнавальної схеми базової для модифікації програми показані на рис. 2.1-2.2. У сенсі формальної логіки ці дії вкладаються у схему, зображену на рис. 2а. Цілісні уявлення про програму в процесі її перегляду піддаються аналізу (А), тобто розчленуванню на окремі компоненти – програмні блоки, оператори, функції, процедури (рис. 2.1). Ці компоненти є завжди більш конкретизованими сутностями, ніж початкова програмна субстанція, що поточно аналізується. Кількість компонентів, що є результатом однократного аналізу, не може перевищувати число Міллера. Інакше ці компоненти не зможуть бути усвідомлені одночасно (не вмістяться в поле уваги). Деталізація цілого більш конкретними компонентами підтримується дедуктивною (D) логікою (рис. 2а), адже компоненти, що є результатом аналізу, мають зберегти логічну цілісність. При переході від концентрації поля уваги на «верхньому» конструкті рис. 2.1 до концентрації на «нижньому» рис. 2.2 відбувається абстрагування (abs) від більшості компонентів «верхнього» конструкту, а компонент, що залишається в полі уваги, піддається аналізу. Далі цикл дій (рис. 2а) – ана-

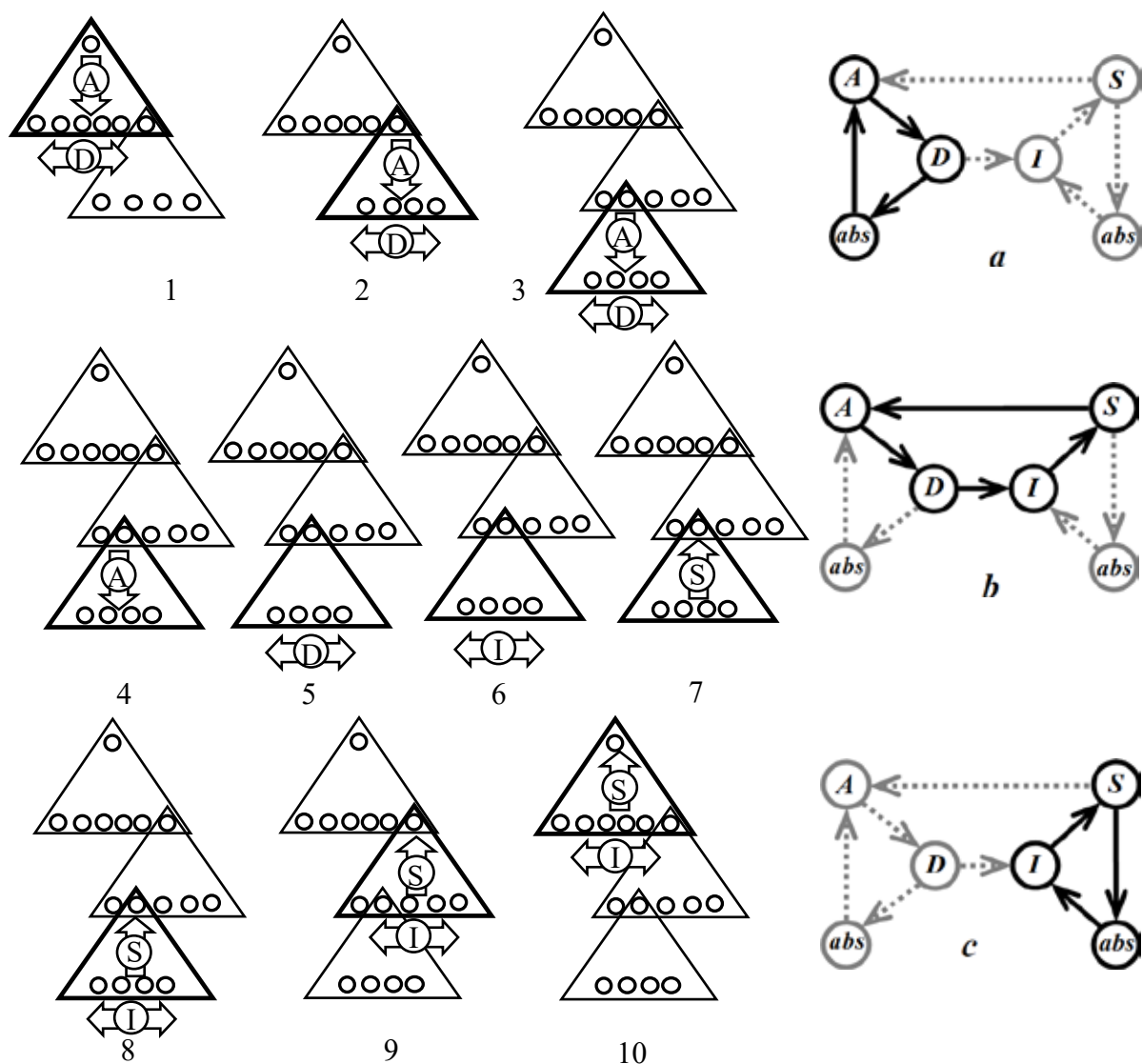


Рис. 2. Еволюція пізнавальної схеми програми в процесі розв’язку задачі

ліз, дедукція, абстрагування – повторюється, але стосовно нижнього конструкту на рис. 2.2. У процесі актуалізації пізнавальної схеми готової частини програми домінують аналітико-дедуктивні дії. Відбувається покрокова низхідна деталізація стосовно вже реалізованого тексту програми. Такий модельний підхід до розгляду пізнавальних схем був розглянутий авторами в ряді робіт раніше. Крайні роботи із цього циклу (Головін, 2018, с. 57–70; Holovina, 2021, с. 18–25).

Критичне обмірковування нового програмного блоку в процесі його утворення, тобто **креативних дій із написання програми.** У цій послідовності ментальних дій спочатку вирішується питання, де має відбутись вставка нового програмного блоку. У ментальній площині цей

новий блок відповідає новому ще не розкритому аналітичними і дедуктивними діями конструкту в пізнавальній схемі програми. Місце вставки лаконічно позначається словом «відбиття» в нижньому щойно актуалізованому конструкті рис. 2.2. Далі сама вставка відповідних відбиттю програмних дій (рис. 2.3). Цей процес починається з абстрагування від всіх думок по «нижньому» конструкту. У свідомості залишається тільки компонент «відбиття», який і піддається спочатку аналітичним, а потім і дедуктивним ментальними діям. Свідомість заповнюється новими компонентами, що і є результатом цих аналітико-дедуктивних дій. У нашому випадку відбувається створення (create) таких програмних кроків:

$$\text{if}(Y < Y_{zm}): V_y = -g \cdot t - V_y; Y_p = Y_{zm}; t = 0$$

Саме цей блок модернізує програму і допомагає демонструвати задум цієї статті. Нижче «нижнього» конструкту (рис. 2.3) з'являється ще один конструкт, відповідний щойно представленим програмним крокам. Зрозуміло, що старий «нижній» конструкт тепер переходить у статус «середнього» рис. 2.3. Закриття ментальних дій стосовно щойно створеного програмного конструкту можна вважати завершеними після того, як поле уваги можна буде звільнити від компонентів цього конструкту, згорнути цей конструкт знов словом «відбиття» і перевести увагу, наприклад, назад з «нижнього» на «середній» конструкт. Із ментальної сторони такий перехід структурою вверх відбувається у процесі індуктивно-синтетичних ментальних дій рис. 2с. Останнє з точки зору ментальної структури проявляється у вигляді схеми рис. 2.8. Такі дії можна вважати перевірочними, тобто критичними, у відношенні до ментальних аналітико-дедуктивних дій рис. 2.3. Іншою матеріалізованою критичністю є перевірка дієздатності програми разом з щойно дописаним фрагментом. Якщо програмний код працює так, як хотілось, тобто завдання виконане, то роботи стосовно модифікації програми завершуються.

Критичне мислення у процесі відлагодження дій у новому програмному блоці. Якщо ментальна критичність або матеріалізовані дії з перевірки програми показали погану або не правильну реалізацію програмного фрагменту, далі реалізується ментальний цикл рис. 2b стосовно конструкту, що поточно усвідомлюється рис. 2.4 – рис. 2.7. Якщо ж щойно написаний код спрацював неправильно, то існує два шляхи дій. Перший включає **аналіз, дедуцію, індукцію та синтез**. Ці дії верифікують зв'язки між компонентами конструкту, що поточно відлагоджується.

Перший шлях відбувається без зміни кроків у полі уваги і полягає в невеликих трансформаціях коду (рис. 2b) без його суттєвої зміни (рис. 2.4 – 2.7). Зокрема, оператори, функції, процедури в коді не змінюються. Змінюються, наприклад, їх деякі параметри. Відбувається підбір цих параметрів. Далі знов прояв критичності, перевірка на дієздатність.

Другий шлях більш складний. Він відбувається зі зміною програмного коду в полі уваги. Тобто **повторно** спрацює схема, зображена на рис. 2.3 з аналітично-дедуктивною логікою

рис. 2а. Формується деякий **інший** програмний код, відповідний поточному конструкту. Якщо позначимо **початковий** код буквою А, то подальші логічні дії формують **новий** код Б. Далі відбуваються дії з підбору параметрів, що зображені на рис. 2b та рис. 2.4-2.7. Сенсом їх є підбір параметрів операторів, функцій, процедур. Далі – дії, зображені на рис. 2.8 з індуктивно-синтетичною логікою рис. 2с. Феномен критичності проявляється через матеріалізовані дії з перевірки дієздатності коду програми.

Підсумуємо. Якщо код А не спрацював належним чином, то дії, зображені на рис. 2.3, з аналітично-дедуктивною логікою рис. 2а повторюються. Останнє формує зовсім інший програмний код Б, відповідний поточному конструкту. Далі – повтор ланцюга дій, зображених на рис. 2b та рис. 2.4-4.7, а також дій, зображених на рис. 2с та рис. 2.8. Якщо ж код Б теж виявився неробочим фрагментом програми, то це може спровокувати формування коду С, а потім і коду Д і так далі.

Після вдалого випробовування відбувається абстрагування і переключення уваги на іншу мікрозадачу, відповідну іншому конструкту.

Інколи для того, щоб запрацював програмний фрагмент, відповідний «найнижньому» конструкту, необхідно вносити зміни у програмні фрагменти, відповідні «середньому» і «найвищому» конструкту. Тоді транзит уваги конструктами рис. 2.1-2.3, рис. 2.4-2.7, рис. 2.8-2.10 супроводжується належними змінами в коді. Відбуваються відповідні критичні логічні дії рис. 2а, 2b, 2с стосовно кожного із конструктів. Треба відмітити, що циклічні дії без переводу уваги, зображені на рис. 2b, з підбором засобів вирішення проблеми можуть відбуватись стосовно конструктів всіх рівнів.

Представлені підходи до механізмів критичного мислення в цілому не конфліктують з методами низхідної покрокової деталізації і технологією модульного програмування (Галіцин, 2009). Ці підходи добре описують взаємодію ментальної і матеріалізованої діяльності людини. Передбачають випробовування після кожного акту критичних ментальних дій стосовно виправлення тексту невеличкого програмного модуля (блоку або фрагменту). Існує безпосередній взаємозв'язок між ментальними логічними діями впродовж критичного

мислення та відповідними матеріалізованими діями з перевірки їх коректності.

Формування концептуальних підходів стосовно рефлексії критичного мислення.

Циклічність процесів критичного мислення. Порційність процесів критичного мислення, що обумовлена невеликим об'ємом короткочасної пам'яті людей (поля уваги), формує циклічність цих процесів. Обмеженість поля уваги детермінує також і порядок консолідації інформації у вигляді ієрархічних понятійних схем, що складаються з конструктів, в довготривалій пам'яті людини, яка програмує. Відмітимо, що ієрархічні понятійні конструкції включають поняття різного ступеня конкретизації (узагальненості). Очевидно, можна припустити, що протокол ментальних критичних дій стосовно складних об'єктів, що вивчаються природничими дисциплінами, мають подібні риси.

Циклічність актів критичного мислення – важливий аспект у механізмі долання будь-якої проблемної ситуації стосовно складного об'єкта. У процесах критичного мислення стосовно складного об'єкта відбуваються численні матеріалізовані дії з перевірки коректності ментальних дій. Можна, очевидно, стверджувати, як це видно з практичного програмування, що стосовно кожного чергового конструкту пізнавальної схеми складного об'єкта здійснюються критичні дії в процесі інших відповідних циклічних ментальних та матеріалізованих дій. Вирішення проблемних ситуацій, що вимагають застосування природничих знань, завжди реалізується через численні критичні дії. Число таких дій можна оцінити через число конструктів, що входять у склад відповідних пізнавальних схем.

Механізми критичного мислення. Критичні дії стосовно складної проблемної ситуації мають свої внутрішні механізми.

Покрокова низхідна деталізація. Перша схема критичного мислення включає ментальний цикл із деталізації та конкретизації проблеми. В окремий акт деталізації входить аналіз, дедукція, абстрагування (рис. 2а). Багатократна деталізація складної проблемної ситуації завершується побудовою ієрархії простіших проблем та гіпотез їх можливих розв'язків. Зрозуміло, що деталізація спрощує кожен окрему проблему в ієрархічній ментальній конструкції,

але збільшує їх кількість. Тому всю ієрархічну конструкцію можна порівняти з пірамідою, яка зверху має поодинокую достатньо абстрактну проблемну ситуацію, а в основі знаходяться чисельні конкретні проблемні ситуації, які можна розв'язати відомими конкретними засобами. У програмуванні ці засоби є окремими операторами, операціями, функціями, процедурами. Вся ця багатоповерхова ієрархічна конструкція тримається на конструктах, компоненти яких мають різний ступінь конкретизації. Конструкти в основі піраміди з'єднують окремі конкретні засоби долання проблем в елементарні механізми, що складаються, максимум, з 7 ± 2 компонентів. Конструкти вищого рівня об'єднують конструкти нижнього, і так до самого верху ментальної структури. У програмуванні конструкти в основі піраміди охоплюють логічно завершені програмні фрагменти, що, зокрема, можуть окреслюватись циклами, розгалуженнями, процедурами і функціями користувача. Ця вся ментальна конструкція поступово формується при пересуванні уваги зверху вниз і знизу вверх конструктами структури та зберігається в довготривалій пам'яті людини, яка намагається розв'язати проблему. У процесі ментальних дій людина може усвідомлювати тільки окремий локальний конструкт в пізнавальній структурі і відповідну йому проблемну ситуацію з усіма її компонентами. Тому критичні дії можуть стосуватись тільки окремого локального конструкта в структурі. Перехід від конструкту до конструкту супроводжується абстрагуванням. Ланцюг роздумів не розривається завдяки спільним компонентам в конструктах. Численні прояви актів критичного мислення цією схемою можна бачити при відлагодженні майже готової програми, часто чужої, коли програміст у режимі деталізації рухається структурою програми від функцій програми як цілісного об'єкта до локального програмного блоку, що не достатньо добре працює. При цьому часто приходиться генерувати гіпотези стосовно функцій тих чи інших програмних фрагментів, локалізувати ці фрагменти, як окремі програми та випробувувати їх. Саме такі випробування є проявом критичності, і саме вони перетворюють гіпотези і здогадки в перевірені твердження. Необхідно відмітити, що акт вдалої перевірки передуює абстрагуванню. Після абстрагування – перевід

уваги і зосередження свідомості на конструкті, що розташований нижче в ментальній структурі об'єкта, на якому зосереджене критичне мислення.

Покрокове висхідне узагальнення. Друга схема критичного мислення реалізує узагальнення і включає індукцію, синтез, абстрагування (рис. 2b). Узагальнення зводить кілька конкретизованих проблемних ситуацій до одної але більш широкої, узагальненої, більш абстрактної. Ментальні критичні дії тут так само усвідомлюються в об'ємі окремого локального конструкту, на якому поточно зосереджена увага. Зрозуміло, що поле уваги, що локалізується почергово на різних конструктах всюди, має об'єм максимум 7 ± 2 компоненти. Саме в результаті індуктивних дій стосовно компонентів конструкту окремі засоби долання конкретних проблем синтезуються в логічно завершеному конструкті у цілісний механізм. Практична перевірка роботи такого механізму і є актом критичності мислення в цій схемі. Робота із втілення ідей, гіпотез (передбачень) стосовно щойно синтезованого логічно завершеного програмного механізму завершується при коректній його роботі. Далі відбувається акт абстрагування (рис. 4b) і перевід уваги з поточного конструкту, що відповідний щойно перевіреному фрагменту, на конструкт розташований вище.

Аналітико-синтетичні симультанні дії. Третя схема критичного мислення (рис. 2c) є схемою, до якої переходить людина у випадках, коли перевірка роботи функціонального вузла складного об'єкта, наприклад, логічно завершеного програмного фрагменту, спрацьовує не так, як заплановано. Тоді в межах відповідного конструкту, без переводу уваги, відбувається підбір компонентів функціонального вузла або параметрів компонентів, без зміни самих компонентів. Зрозуміло, що чисті аналітико-синтетичні дії можуть набувати сенс, коли аналітичні дії супроводжуються дедуктивними, а синтетичні є наслідком індуктивних. Критичність думок тут реалізується перевірками на дієздатність функціонального вузла, або логічно завершеного фрагменту програми. Так перевірка реалізується у двох випадках. У першому випадку, наприклад, при відлагодженні в цілому вже написаної програми, при ментальному пересуванні уваги від загального

до конкретного. У другому випадку – при відлагодженні щойно написаного коду, при ментальному пересуванні уваги від конкретного до загального. У першому випадку людина входить в цикл аналітико-синтетичних симультанних дій стартуючи з аналізу (далі дедукція, індукція), а в другому випадку старт відбувається з індукції, а далі вже синтез, аналіз, дедукція. Аналітичне дослідження готового фрагменту тексту програми і дедуктивне зв'язування відповідних програмних компонентів завершується матеріалізованою перевіркою роботи фрагменту. Якщо фрагмент, відповідний ментальному конструкту, не запрацював належним чином, то далі – невеликі зміни параметрів у контексті індуктивно-синтетичних дій і знов перевірка. І так багатократний підбір параметрів або навіть і заміна окремих компонентів без зміни поля уваги. Завершення цих дій без переводу уваги стосовно конкретного конструкту і перевід уваги на інший конструкт структурою вверх або вниз відбувається після успішного завершення перевірки дієздатності фрагменту.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Розуміння сутності фізичних явищ та процесів потребує критичності, креативності та гнучкості мислення. Тому за об'єкт дослідження вибрано фізичну задачу. Моделювання такого типу задач за допомогою програмування дозволяє реалізувати мету, візуалізувати самі процеси, концентровано продемонструвати етапи мислення та їх еволюцію.

Розкрито особливості критичних ментальних та матеріалізованих дій людини в термінах формальної логіки. Проведено аналіз трансформації пізнавальних схем у процесі критичного мислення.

Сформовано концептуальні підходи стосовно рефлексії критичного мислення. Запропоновано розглядати критичне мислення в контексті трьох схем, що базуються на конкретизації, узагальненні та симультанному аналізу і синтезі. Встановлено нерозривний зв'язок схем критичного мислення між собою і необхідність їх дотримання при ментальній рефлексії.

Розуміння сутності механізмів критичного мислення в ідеалі допоможе в реалізації підготовки фахівців з природничих наук, для яких

в силу роботи зі складно організованими матеріальними (природними і штучними) об'єктами є потрібною та характерною причинно-наслідковість, абстрактно-логічність, критичність мислення. Моделювання процесів і явищ може привнести в це мислення креативність, новаторство та творчість. Такі фахівці будуть рости нову генерацію мислячих людей. У цьому контексті надзвичайно важливим та перспективним бачиться поєднання через моделювання процесів і явищ, зокрема таких навчальних предметів, як математика, програмування та фізика. Перспективною бачиться інтерпретація

роботи моделі механізму критичного мислення на прикладах виконання лабораторних робіт з фізики, математики, хімії, біології. Подальше розширення застосування розглянутого механізму моделі критичного мислення може стосуватись гуманітарних дисциплін, широкого кола різноманітних проблемних життєвих ситуацій, в тому числі побутового плану. Автори роботи вважають, що через розуміння технологічних особливостей планування діяльності комп'ютера, тобто його програмування, можна навчитися вдосконалювати та оптимізувати власну рефлексію.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Дьюи Дж. Психология и педагогика мышления / пер. с англ. Н.М. Никольской. Москва : Юрайт, 2021. 166 с.
2. Леви-Брюль Люсьен. Первобытный менталитет / пер. с фр. Е. Калыцикова. СанктПетербург : Европейский Дом, 2002. 400 с.
3. Павловська О.В. Логіка та дологічне мислення. *Актуальні проблеми філософії та соціології*. Одеса, 2021. Вип. 29. С. 24–27. URL: <https://doi.org/10.32837/apfs.v0i29.955>.
4. Фромм Э. Анатомия человеческой деструктивности / пер. с англ. Э.М. Телятникова. Москва : АСТ, 2014. 810 с.
5. Андерсон Дж. Когнитивная психология. 5-е изд. СанктПетербург : Питер, 2002. 496 с.
6. Леонтьев Д.А., Аверина А.Ж. Феномен рефлексии в контексте проблемы саморегуляции. *Психологические исследования: электрон. науч. журн.* 2011. № 2(16). URL: <https://psystudy.ru/index.php/num/article/view/860>.
7. Кукла А. Ментальные ловушки: Глупости, которые делают разумные люди, чтобы испортить себе жизнь / пер. с англ. 2-е изд. Москва : Альпина Бизнес Букс, 2008. 146 с.
8. Терно С.О. Критичне мислення – сучасний вимір суспільствознавчої освіти. Запоріжжя : Просвіта, 2009. 268 с.
9. Канеман Деніел. Мислення швидко і повільно. Київ : Наш формат, 2017. 480 с.
10. Miller George A. The Magical Number Seven, Plus or Minus Two. *The Psychological Review*. 1956. Vol. 63. Issue 2. P. 81–97.
11. Головін М.Б., Головіна Н.А., Головіна Н.М. Модельний розгляд пізнавальних процесів, супутніх навчальному програмуванню. *Психологічні перспективи*. Луцьк, 2018. Вип. 31. С. 57–70. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppst_2018_31_7.
12. Holovina Nina, Holovin Mykola. Modeling of physical phenomena as a methodological means of forming a knowledge structure in physics and programming. *ScienceRise: Pedagogical Education*, (43), 18–25, 2021.
13. Галіцин В.К., Сидоренко Ю.Т., Потапенко С.Д. Технологія програмування і створення програмних продуктів : навчальний посібник. Київ : КНЕУ, 2009. 372 с.

REFERENCES:

1. Dewey J. (2021). *Psychologiya i pedagogika myshleniya*. [Psychology and pedagogy of thinking] Moskva: Yuright [in Russian].
2. Levy-Bruhl Lucien. (2002). *Pervobytnyi mentalitet* [Primitive mentality]. St. Petersburg: European House. [in Russian].
3. Pavlovska O. V. (2021). Logika ta dologichne myslennya [Logic and pre-logical thinking]. *Actual`ni problemy filosofii i sotsiologii – Actual problems of philosophy and sociology*, 29, 24-27. <https://doi.org/10.32837/apfs.v0i29.955> [in Ukrainian]
4. Fromm E. (2014). *Anatomiya chelovecheskoi destruktivnosti*. [Anatomy of human destructiveness]. Moskva: AST. [in Russian].
5. Anderson J. (2002). *Kognitivnaya psihologiya*. [Cognitive psychology]. St. Petersburg: Peter. [in Russian].
6. Leontiev D. A., Averina A. Zh. (2011). Fenomen refleksii v kontekste problemy samoregulyatsii [The phenomenon of reflection in the context of the problem of self-regulation]. *Psihologicheskie issledovaniya – Psychological research: electronic. science journal* 2(16). [in Russian]. <https://psystudy.ru/index.php/num/article/view/860>

7. Kukla A. (2008). *Mental'nye lovushki: Gluposti, kotorye delayut razumnye lyudi chtoby isportit` sebe zhizn`*. [Mental traps: Stupid things that intelligent people do to spoil their lives]. Moskva: Alpina Business Books. [in Russian]
8. Terno S. O. (2009). *Krytychne myslennya – suchasnyi vymir suspil`stvoznavchoi osvity*. [Critical thinking – a modern dimension of social science education]. Zaporizhzhia: Prosvita. [in Ukrainian]
9. Kahneman Daniel. (2017). *Myslennya shvydke i povil`ne*. [Thinking is fast and slow]. Kyiv: Nash format. [in Ukrainian]
10. Miller George A. (1956). The Magical Number Seven, Plus or Minus Two. *The Psychological Review*. 63, 2, 81–97.
11. Holovin M.B., Holovina N.A., Holovina N.M. (2018). Model'nyi rozglyad piznaval`nyh protsesiv, suputnih navchal`nomu programuvannyu. [Model review of cognitive processes associated with educational programming]. *Psychologichni perspektyvy – Psychological perspectives*. 31, 57-70. [in Ukrainian] http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppst_2018_31_7
12. Holovina Nina, Holovin Mykola (2021). Modeling of physical phenomena as a methodological means of forming a knowledge structure in physics and programming. *ScienceRise: Pedagogical Education*, 43, 18-25.
13. Galitsyn V.K., Sydorenko Y.T., Potapenko S.D. (2009). *Tehnologiya programuvannya I stvorennya programnyh produktiv*. [The technology of programming and creation of software products: training. manual]. Kyiv: KNEU [in Ukrainian].

УДК 378.147:621.3

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-3>

Андрій КЕВШИН

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій Навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0002-3581-8852

SCOPUS-AUTHOR ID: 35422272900

Володимир ГАЛЯН

доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій Навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0003-0066-7174

SCOPUS AUTHOR ID: 35422525700

Аліна ТРЕТЯК

інженер кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0002-1776-5339

SCOPUS AUTHOR ID: 35729868000

Юлія АРТЮХ

студентка Навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0002-4688-3537

Володимир ШАФАРЧУК

студент Навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0001-8899-3681

Олександр НИКИФОРОВ

студент Навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0002-1824-9192

Денис КУРШЕЛЬ

студент Навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0003-1995-6857

Бібліографічний опис статті: Кевшин, А., Галян, В., Третяк А., Артюх, Ю., Шафарчук, В., Никифоров, О., Куршель, Д. (2022). Використання практичних та лабораторних занять під час вивчення складних лінійних електричних кіл постійного струму в курсі електротехніки. *Фізика та освітні технології*, 1, 27–33, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-3>

**ВИКОРИСТАННЯ ПРАКТИЧНИХ ТА ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ
ПІД ЧАС ВИВЧЕННЯ СКЛАДНИХ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В КУРСІ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ**

Розглянуто актуальність отримання здобувачами вищої освіти теоретичних знань та практичних навичок під час вивчення електротехніки у вищих навчальних закладах для розрахунку складних електричних кіл, що містять декілька вузлів, віток, контурів. Такі знання необхідні спеціалістам, що працюють у галузі інформаційних технологій, енергетики, промислового виробництва або просто у повсякденному житті та можуть бути використані для правильної експлуатації різних електротехнічних установок.

Зокрема, у статті проаналізовано особливості вивчення складних лінійних електричних кіл постійного струму в курсі «Електротехніка» на практичних та лабораторних заняттях. Розрахунок струмів у вітках електричного кола здійснено на основі першого та другого законів Кірхгофа. Детально розглянуто методику розрахунку для електричного кола, що містить два незалежних контури, три джерела ЕРС та три різних опори. Складені рівняння для незалежних контурів запропоновано записувати у матричному вигляді, що значно спрощує знаходження невідомих струмів.

Акцентовано увагу на необхідності проведення лабораторних робіт під час вивчення електротехніки для кращого розуміння студентами нового матеріалу. Нині на ринку є можливість купити різноманітне лабораторне устаткування, але виробник, як правило, не дає методичні вказівки для проведення лабораторних робіт. Отже, виникає необхідність самостійно це робити. У зв'язку із цим обґрунтовано використання панелей «Лінійні електричні кола» вітчизняного виробника під час виконання лабораторних робіт з електротехніки для набуття практичних навичок з вивчення складних електричних кіл. Розроблено теоретичні відомості для виконання лабораторної роботи «Дослідна перевірка законів Кірхгофа», які можна ефективно використовувати на заняттях зі студентами вищих навчальних закладів.

Поєднання теорії та розробленої лабораторної роботи дозволить студентам навчитися не тільки правильно проводити теоретичні розрахунки, а й складати розгалужені кола, здійснювати необхідні вимірювання, що допоможе набуттю необхідних фахових компетентностей майбутнього фахівця.

Ключові слова: електричне коло, незалежний контур, електричний струм, закони Кірхгофа.

Andriy KEVSHYN

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Experimental Physics, Information and Educational technologies of the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0002-3581-8852

SCOPUS-AUTHOR ID: 35422272900

Volodymyr HALYAN

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Experimental Physics, Information and Educational technologies of the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0003-0066-7174

SCOPUS AUTHOR ID: 35422525700

Alina TRETAK

Engineer at the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Avenue, Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0002-1776-5339

SCOPUS AUTHOR ID: 35729868000

Yulia ARTIUKH

Student at the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0002-4688-3537

Volodymyr SHAFARCHUK

Student at the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0001-8899-3681

Oleksandr NYKYFOROV

Student at the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0002-1824-9192

Denys KURSHHEL

Student at the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0003-1995-6857

To cite this article: Kevshyn, A., Halyan, V., Tretyak, A., Artiukh, Y., Shafarchuk, V., Nykyforov, O., Kurshel, D. (2022). Vykorystannia praktychnykh ta laboratornykh zaniat pid chas vyvchennia skladnykh liniinykh elektrychnykh kil postiinoho strumu v kursi elektrotekhniki [The use of practical and laboratory classes in the study of complex linear electric circuits of direct current in the course of electrical engineering]. *Physics and Educational Technology*, 1, 27–33, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-3>

THE USE OF PRACTICAL AND LABORATORY CLASSES IN THE STUDY OF COMPLEX LINEAR ELECTRIC CIRCUITS OF DIRECT CURRENT IN THE COURSE OF ELECTRICAL ENGINEERING

The relevance of obtaining theoretical knowledge and practical skills by students of higher education when studying electrical engineering in higher educational institutions for the calculation of complex electric circuits containing several nodes, branches, and contours is considered. Such knowledge is necessary for specialists working in the field of information technology, energy, industrial production or just in everyday life and can be used for the correct operation of various electrical installations.

In particular, the article analyzes the peculiarities of studying complex linear electric circuits of direct current in the course “Electrical Engineering” in practical and laboratory classes. The calculation of the currents in the circuits of the electric circuit was carried out on the basis of Kirchhoff’s first and second laws. The calculation method for an electric circuit containing two independent circuits, three EMF sources and three different resistances is considered in detail. Compound equations for independent circuits are proposed to be written in matrix form, which greatly simplifies the finding of unknown currents.

Emphasis is placed on the need to conduct laboratory work when studying electrical engineering for a better understanding of new material by students. Today on the market there is an opportunity to buy a variety of laboratory equipment, but the manufacturer, as a rule, does not give methodological instructions for conducting laboratory work. Therefore, there is a need to do it yourself. In this regard, the use of “Linear electric circuits” panels of the domestic manufacturer during the performance of laboratory work on electrical engineering to acquire practical skills in the study of complex electric circuits is substantiated. Theoretical information for the laboratory work “Experimental verification of Kirchhoff’s laws” has been developed, which can be effectively used in classes with students of higher educational institutions.

The combination of theory and developed laboratory work will allow students to learn not only to correctly perform theoretical calculations, but also to make branched circuits, to make the necessary measurements, which will help to acquire the necessary professional competences of the future specialist.

Key words: electric circuit, independent contours, electric current, Kirchhoff’s laws.

Актуальність проблеми.

Нині електротехніка є однією із самих складних дисциплін, але водночас дуже необхідною у сучасному світі, оскільки займається вивченням застосування магнітних та електричних явищ у повсякденному житті. Теоретичні знання та практичні навички, отримані здобувачами вищої освіти під час вивчення електротехніки, необхідні спеціалістам, що працюють у галузі інформаційних технологій, енергетики, промислового виробництва або

просто у повсякденному житті. Для правильної експлуатації різних електротехнічних установок необхідно знати величини струмів, що проходять через різні його елементи. Такі установки можуть містити складні електричні кола, що мають декілька вузлів, віток, контурів. Безпосереднє використання закону Ома для повного кола в таких випадках може призвести до помилок у розрахунках. Тому для розв’язання таких проблем необхідно використовувати інші підходи.

Мета дослідження – розглянути можливість використання практичних та лабораторних занять під час вивчення складних лінійних електричних кіл постійного струму в курсі «Електротехніка» для інтегрування знань студентів.

Виклад основного матеріалу.

Щоб уміти правильно розраховувати складні лінійні електричні кола постійного струму, необхідно володіти основними поняттями з фізики в галузі електрики (чітко розуміти, що таке електричний струм, напруга, ЕРС джерела), та вміти математично розв'язувати системи лінійних рівнянь. Одним зі способів розрахунку розгалужених електричних кіл, що містять декілька вузлів, ділянок, контурів, є використання законів Кірхгофа (Кевшин, 2021).

Згідно з першим законом Кірхгофа, *алгебраїчна сума струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює нулю*

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

При цьому струмам, що спрямовані до вузла, привласнюють один знак, наприклад позитивний, а струмам, що спрямовані від вузла, – інший знак, наприклад, негативний. Згідно з іншим формулюванням першого закону Кірхгофа: *сума струмів, що притікають до вузла, дорівнює сумі струмів, що виходять з нього.*

Згідно з другим законом Кірхгофа: *в замкненому контурі алгебраїчна сума спадів напруг на опорах усіх елементів контуру дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС, що діють у цьому контурі*

$$\sum_{k=1}^i \pm I_k R_k = \sum_{k=1}^i \pm E_k$$

Напрями обходу кожного контуру вибирають довільно. Перед спадом напруги ставиться знак «+», якщо напрям обходу контуру співпадає з вибраним додатним напрямом струму в даному контурі, і знак «-», якщо ці напрями протилежні. Якщо напрям обходу контуру співпадає з напрямом ЕРС, то ця ЕРС входить до рівняння зі знаком «+», і навпаки.

Перш ніж експериментально розраховувати розгалужені електричні кола, студенти мають навчитися це робити теоретично, тобто на практичних заняттях, мета яких – поглибити, розширити, деталізувати знання, отримані на лекції в узагальненому вигляді, і сприяти напрацюванню навичок професійної діяльності (Стьопін, 2016). Наприклад, на практичному

занятті зі студентами можна розглянути таку типову задачу з цієї тематики.

Задача. У схемі на рис. 1 E_1 – елемент з ЕРС, що рівна 4 В; $E_2 = 3$ В; $E_3 = 5$ В; $R_1 = 2$ Ом; $R_2 = 6$ Ом; $R_3 = 1$ Ом. Знайти силу струму, що протікає через опір R_2 і спад напруги на опорі R_1 .

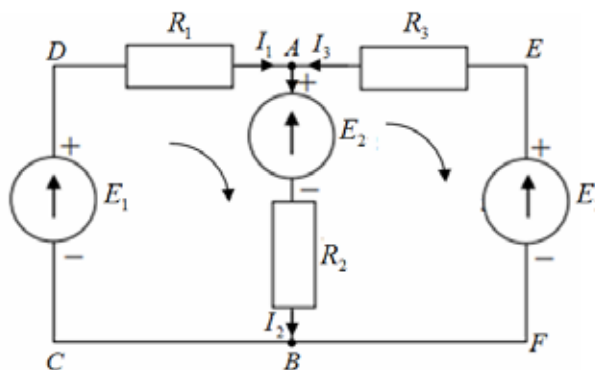


Рис. 1. Схема розгалуженого кола

Така схема має два вузли (A і B) і два контури (ABCD і ABFE). Для вузла A, згідно з першим законом Кірхгофа, можемо записати:

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0 \tag{1}$$

Обхід контуру ABCD виберемо за годинниковою стрілкою. Тоді для цього контуру за другим законом Кірхгофа можемо записати:

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = E_1 - E_2 \tag{2}$$

Обхід контуру ABFE виберемо також за годинниковою стрілкою. Тоді для цього контуру за другим законом Кірхгофа можемо записати:

$$-I_2 R_2 - I_3 R_3 = E_2 - E_3 \tag{3}$$

Підставимо дані в (2):

$$2I_1 + 6I_2 = 4 - 3$$

$$2I_1 + 6I_2 = 1 \tag{4}$$

Підставимо дані в (3):

$$-6I_2 - I_3 = 3 - 5$$

$$6I_2 + I_3 = 2 \tag{5}$$

Запишемо систему рівнянь (1), (4) і (5) у матричному вигляді:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 2 & 6 & 0 \\ 0 & 6 & 1 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

де A – основна матриця системи, її елементами є коефіцієнти у разі невідомих струмів; B – матриця стовпець вільних членів (ЕРС).

Запишемо і знайдемо головний визначник Δ матриці A :

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 2 & 6 & 0 \\ 0 & 6 & 1 \end{vmatrix} = 20$$

Знайдемо визначник Δ_{I_1} , що отриманий заміною відповідних стовпців визначника Δ стовпцями матриці B .

$$\Delta_{I_1} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 6 & 0 \\ 2 & 6 & 1 \end{vmatrix} = -5$$

Аналогічно знаходимо визначник Δ_{I_2} :

$$\Delta_{I_2} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \end{vmatrix} = 5$$

Тоді:

$$I_1 = \frac{\Delta_{I_1}}{\Delta} = \frac{-5}{20} = -0,25 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{\Delta_{I_2}}{\Delta} = \frac{5}{20} = 0,25 \text{ A}$$

Знак « \rightarrow » в значенні сили струму I_1 означає, що цей струм буде йти у протилежному, позначеному на рисунку напрямку.

Спад напруги U_1 на опорі R_1 , згідно із законом Ома для ділянки кола, буде рівним:

$$U_1 = I_1 R_1 = 0,25 \cdot 2 = 0,5 \text{ B}$$

Відповідь: $I_2 = 0,25 \text{ A}$; $U_1 = 0,5 \text{ B}$.

Однією з форм практичного застосування знань, отриманих у разі вивчення технічних та фахових навчальних дисциплін, є лабораторні і практичні заняття (Корець, 2019). Теоретичні розрахунки складних лінійних електричних кіл постійного струму ґрунтовно засвоюються здобувачами вищої освіти під час виконання лабораторних робіт з цієї тематики. Для цього можна використати панель «Лінійні електричні кола», що входить до стенду «Електротехніка. Основи електроніки УТЛЕ-01».

Зверху на панелі нанесений малюнок принципової її схеми, розміщені клеми, що призначені для підключення джерел живлення, вимірювальних пристроїв, мікроперемикачі, які дозволяють змінювати параметри схеми, індикатори та ручки регуляторів. За допомогою такої панелі можна виконувати лабораторну роботу «Дослідна перевірка законів Кірхгофа». Виробник цього устаткування не надає інструкцій до виконання лабораторних робіт, їх потрібно розробляти самостійно. Як один із варіантів можна запропонувати таку послідовність виконання вказаної лабораторної роботи.

Хід роботи

1. Ознайомитися з обладнанням панелі «Лінійні електричні кола».
2. Підключивши вольтметр до кожного із двох джерел, які використовуються в цій лабо-

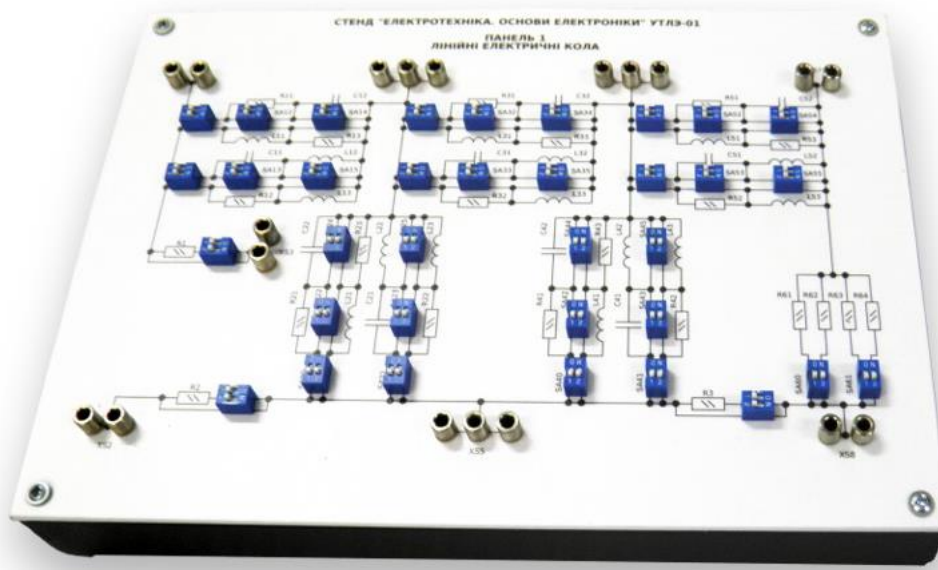
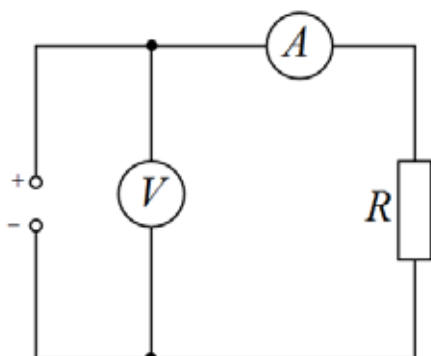


Рис. 2. Зовнішній вигляд панелі «Лінійні електричні кола»

раторній роботі, виміряти їх ЕРС ε_1 та ε_2 і записати їх значення у таблицю 1.

3. Скласти коло з кожним із джерел для визначення їх внутрішнього опору.



Виміряти струм у колі і напругу на затискачах джерела. Обчислити внутрішній опір джерела за формулою:

$$r = \frac{\varepsilon - U}{I}$$

Результати вимірювань записати у таблицю 1.

Таблиця 1

$\varepsilon_1, \text{В}$	$r_1, \text{Ом}$	$\varepsilon_2, \text{В}$	$r_2, \text{Ом}$

4. Для перевірки першого закону Кірхгофа скласти електричне коло, зображене на рис. 3. На панелі в якості R_1 взяти опір із позначенням R_1 , в якості R_2 взяти один із наступних опорів (R_{61}, R_{62}, R_{63} або R_{64}), в якості R_3 взяти один із наступних опорів (R_{41}, R_{42} або R_{43}). Конкретне значення опору задає викладач.

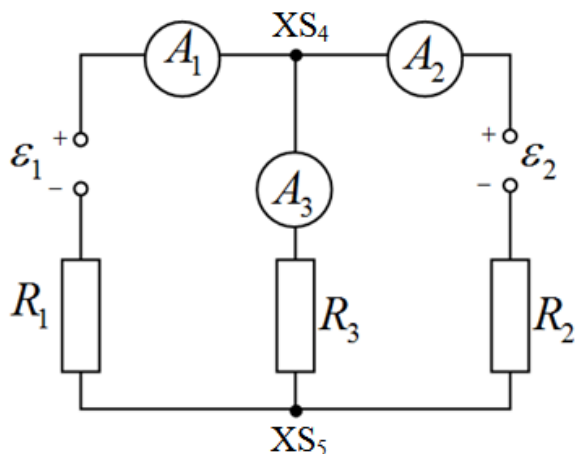


Рис. 3. Схема для перевірки першого та другого законів Кірхгофа

5. Результати вимірювань записати у таблицю 2

Таблиця 2

$I_1, \text{мкА}$	$I_2, \text{мкА}$	$I_3, \text{мкА}$

6. Перевірити виконання першого закону Кірхгофа.

7. Теоретично розрахувати значення струмів I_1, I_2, I_3 та перевірити отримані значення з експериментальними даними.

8. Перевірити справедливості другого закону Кірхгофа. Для цього необхідно: позначити полярність напруг на всіх ділянках кола. Струм через резистор тече в напрямку зменшення потенціалу, тобто від точки з більшим потенціалом “+” до точки з меншим потенціалом “-“. Напруга завжди має напрям від “+” до “-“. Тому на резисторі напрями напруги і струму збігаються. Для джерел ЕРС спрямована від “-“ до “+”, тому напруга на затискачах джерела ЕРС спрямована назустріч ЕРС.

9. Виміряти напругу на кожній із ділянок кола, підключаючи вольтметр відповідно до позначеної на схемі полярності напруг (затискач вольтметра “V” підключати до точки “+”). Результати вимірювань занести до таблиці 3.

Таблиця 3

$U_{\varepsilon_1}, \text{В}$	$U_{R_1}, \text{В}$	$U_{\varepsilon_2}, \text{В}$	$U_{R_2}, \text{В}$	$U_{R_3}, \text{В}$

10. За результатами вимірювань напруг на різних ділянках кола розрахувати алгебраїчну суму напруг $\sum U$ в усіх можливих контурах і переконатися у справедливості другого закону Кірхгофа.

Висновки. Поєднання теоретичних розрахунків складних лінійних електричних кіл постійного струму з виконанням лабораторних занять сприяє більш глибокому засвоєнню здобувачами вищої освіти такого матеріалу. Такий симбіоз теорії та практики дозволить студентам навчитися не тільки правильно проводити теоретичні розрахунки, а й складати розгалужені кола, здійснювати необхідні вимірювання, що допоможе набуттю необхідних фахових компетентностей майбутнього фахівця.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Кевшин А.Г., Новосад О.В., Федосов С.А. Електротехніка : навчальний посібник. Луцьк, 2021. 127 с.
2. Стюпін Ю.О., Попова І.О. Можливість використання практичних занять під час вивчення теоретичних основ електротехніки для інтегрування знань студентів. Мелітополь. 2016. Вип. 20. С. 91–97.
3. Корець М.С. Методика викладання технічних навчальних дисциплін : навчальний посібник. Київ : Вид-во НПУ імені М.П. Драгоманова, 2019. 240 с.

REFERENCES:

1. Kevshyn, A.H., Novosad, O.V., Fedosov, S.A. (2021). Elektrotekhnika: navchalnyi posibnyk. Lutsk, 2021. 127 s. [in Ukrainian].
2. Stopin, Yu.O., Popova, I.O. (2016). Mozhlyvist vykorystannia praktychnykh zaniat pry vyvchenni teoretychnykh osnov elektrotekhniky dlia intehruvannia znan studentiv. Melitopol. Vyp. 20. S. 91–97. [in Ukrainian].
3. Korets, M.S. (2019). Metodyka vykladannia tekhnichnykh navchalnykh dystsyplin: navchalnyi posibnyk. Kyiv: Vyd-vo NPU imeni M.P. Drahomanova. 240 s. [in Ukrainian].

УДК 5:378.091.313-044.247:[004:5:62]

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-4>

Олександр МАРТИНЮК

доктор педагогічних наук, доцент, професор кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0003-4473-7883

SCOPUS-AUTHOR ID: 57224619200

Галина МИРОНЧУК

доктор фізико-математичних наук, професор, директор Навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0002-9088-3825

SCOPUS-AUTHOR ID: 36245422900

Сергій ПАНКЕВИЧ

аспірант кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0002-5715-2107

Бібліографічний опис статті: Мартинюк, О., Мирончук, Г., Панкевич, С. (2022). Організаційно-методичні умови використання цифрових лабораторій у системі впровадження освітнього напрямку STEM. *Фізика та освітні технології*, 1, 34–40, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-4>

ОРГАНІЗАЦІЙНО-МЕТОДИЧНІ УМОВИ ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ЛАБОРАТОРІЙ У СИСТЕМІ ВПРОВАДЖЕННЯ ОСВІТНЬОГО НАПРЯМУ STEM

Сучасні освітні вимоги щодо виховання активної й творчої особистості передбачають набуття вміння адаптуватися до стрімких змін сьогодення, генерувати нестандартні рішення завдань для навчання впродовж усього життя. Завдання закладів освіти – забезпечення реалізації цих якостей, формування предметних та ключових компетенцій, формування засобів підвищення мотивації до навчання. У статті проаналізовано аспекти концепції впровадження напрямку STEM в світову та вітчизняну освітню галузь. Проведений аналіз наукових праць з проблеми розвитку STEM-освіти дозволив встановити особливості навчання фізики з врахуванням впровадження сучасних технологій. До складників STEM-навчання фізики відносять засоби дистанційного, змішаного навчання у поєднанні із сучасними мережевими технологіями. Така концепція особливо актуальна в умовах воєнного стану. Керуючись рекомендаціями державної програми підвищення якості природничо-математичної освіти, акцентовано увагу на використанні сучасних цифрових лабораторій. Використання цифрових лабораторій дає можливість організувати фізичний експеримент на принципово новому рівні. Наведено приклад комплексного виконання експерименту з використанням цифрової лабораторії. Результати проведеного педагогічного експерименту переконливо доводять, що використання цифрових лабораторій є потужним інструментом та ефективним засобом навчання учнів та студентів.

Ключові слова: освітній напрям STEM, цифрова лабораторія, змішане навчання, фізичний експеримент.

Oleksandr MARTYNIUK

Doctor of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0003-4473-7883

SCOPUS-AUTHOR ID: 57224619200

Galina MYRONCHUK

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Director of the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0002-9088-3825

SCOPUS-AUTHOR ID: 36245422900

Serhii PANKEVYCH

Postgraduate Student, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0002-5715-2107

To cite this article: Martyniuk, O., Myronchuk, G., Pankevych, S. (2022). Orhanizatsiino-metodychni umovy vykorystannia tsyfrovyykh laboratorii u systemi vprovadzhennia osvithnoho napriamu STEM [Organizational and methodological conditions for the use of digital laboratories in the system of STEM educational direction implementation]. *Physics and Educational Technology*, 1, 34–40, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-4>

ORGANIZATIONAL AND METHODOLOGICAL CONDITIONS FOR THE USE OF DIGITAL LABORATORIES IN THE SYSTEM OF STEM EDUCATIONAL DIRECTION IMPLEMENTATION

Modern educational requirements for the education of an active and creative personality provide for the acquisition of the ability to adapt to the rapid changes of today, to generate non-standard solutions to tasks for lifelong learning. The task of educational institutions is to ensure the realization of these qualities, the formation of subject and key competencies, the formation of means of increasing the motivation of students to study. The article analyzes the aspects of the concept of introducing the STEM direction into the global and domestic education industry. The analysis of scientific works on the problem of the development of STEM education made it possible to establish the peculiarities of teaching physics, considering the introduction of modern technologies. The components of STEM education in physics include means of distance, blended learning in combination with modern network technologies. This concept is especially relevant in the conditions of martial law. Guided by the recommendations of the state program for improving the quality of science and mathematics education, emphasis is placed on the use of modern experimental tools and digital laboratories. The use of digital laboratories makes it possible to organize a physical experiment at a fundamentally new level. An example of complex research implementation with the use of a digital laboratory is presented. The results of the conducted pedagogical experiment convincingly prove that mixed learning technologies using digital laboratories are powerful tool in the work of the teacher and an effective means of learning for pupils and students.

Key words: STEM educational direction, digital laboratory, blended learning, physical experiment.

Вступ. В Україні уже не перший рік впроваджується світовий освітній бренд STEM-освіта (Science, Technology, Engineering, Mathematics), що сприяє посиленню інтелектуального розвитку та якісному навчанню природничих й інженерно-технічних дисциплін. Робототехніка, конструювання, програмування, моделювання, 3D-проекткування та багато іншого – ось що тепер цікавить сучасних молодь усього світу. Для реалізації цих інтересів необхідні більш складні навички та компетенції. Важливо не тільки знати й уміти, але також досліджувати та винаходити. Необхідно одночасно розвиватися в таких ключових академічних сферах, як наука, математика, технології та інженерія, які можна об'єднати одним словом – STEM.

STEM – інтегрований підхід до навчання, в рамках якого академічні науково-технічні концепції вивчаються в контексті реального життя. Ціль такого підходу – створення стійких зв'язків між школою, суспільством, роботою й цілим світом (Іванченко).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Абревіатура «STEM» була вперше запропонована американським бактеріологом Р. Колвелл в 1990-х роках, але активно почала використовуватися з 2000-х років. Нині STEM є однією з головних тенденцій у світовій освіті. Завдяки стрімкому розвитку технологій з'являються нові професії, повсюдно росте потреба в спеціалістах STEM. До прикладу, в європейських країнах прогнозується, що попит на професіоналів у галузі STEM зросте до 2025 року на 8%,

тоді як на інші професії – лише на 3%. У більш ніж 10 країнах Європи розроблені національні стратегії та ініціативи у сфері розвитку і поширення STEM-освіти (Німеччина, Франція, Італія, Нідерланди, Норвегія, Великобританія, Ірландія, Іспанія та інші).

STEM-технології активно впроваджуються в закладах освіти Німеччини, Франції, Великобританії, Австралії, Китаю, Ізраїлю. США у 2009 р. Конгрес запровадили закон «Про координацію дій в області STEM-освіти» (STEM Education Coordination Act of 2009) (Валько, 2018; Валько, 2018).

Особливо інтенсивного розвитку набула STEM-освіта і в Україні, починаючи із прийняття Закону України «Про Основні засади розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки», який є чинним і нині (Про Основні засади розвитку інформаційного суспільства в Україні, 2007). Цей фундаментальний закон сприяв актуалізації проблеми розробки нових програм, методів навчання для закладів вищої та загальноосвітніх закладів середньої освіти на базі принципів STEM. Нового імпульсу у розвитку таких технологій освіта одержала після прийняття Кабінетом Міністрів України Розпорядження № 67-р від 17 січня 2018 р., якими затверджено принципи цифровізації Українського суспільства.

Керуючись документами законодавчої та нормативної бази, що окреслюють напрямки розвитку освіти в Україні, робимо висновки про необхідність впровадження технологічного забезпечення освітньої галузі (Стрижак, Сліпухіна та ін., 2017). Тому не випадково перед освітою постало питання необхідності змін у галузі точних, природничих наук та технологій. Сучасний рівень науково-технічного прогресу підвищує роль технічного складника в підготовці майбутніх фахівців, що вимагає використання новітніх технологій навчання для набуття необхідних компетентностей здобувачів освіти. Використання у такій якості STEM-технологій як засобу навчання в методиці навчання природничих наук є поєднанням різних підходів, зокрема інтеграційного та компетентісного, що дозволяє підсилити професійну спрямованість підготовки учнів до здобуття профільної освіти (Садовий, Каленчук, Каленчук, 2021). Окремі аспекти впровадження технологій STEM розглядали україн-

ські науковці: Петро Атаманчук (Атаманчук, Форкун, 2019) (STEM-інтеграція, як важлива інноватика сучасної освітньої парадигми), Ольга Кузьменко (Кузьменко, 2016) (навчання фізики студентів технічних закладів вищої освіти на основі технологій STEM-освіти), Ірина Сліпухіна, Олександр Стрижак, Ігор Чернецький (Стрижак, Сліпухіна та ін., 2017) (особливості застосування мультидисциплінарного підходу у STEM-навчанні, науковий та інженерний методи процесів дослідження у навчанні природничо-математичних дисциплінах) та інші. Особливості формування проєктно-технологічної компетентності визначено у роботах Миколи Садового (Садовий, Каленчук, Каленчук, 2021), Ірини Василяшко та Тетяни Білик (Василяшко, Білик, 2017) вивчали проблему використання та впровадження засобів STEM-технологій.

Незважаючи на достатньо багатий теоретичний доробок вітчизняних та закордонних учених, **актуальною** є проблема реалізації методики поєднання натурного експерименту та цифрових технологій у системі STEM-освіти (Martyniuk, Martyniuk etc., 2021). Не менш важливим є розроблення методичних рекомендацій для забезпечення здобуття освіти наукового та прикладного (фахового) спрямування. **Мета статті** – окреслення концепції поєднання натурного експерименту з використанням цифрової лабораторії як інструменту реалізації змішаного навчання в системі STEM-освіти.

Виклад основного матеріалу дослідження. Освітній напрям STEM виникла за запитом бізнесу, адже на сьогодні переважна частина робочої сили не має навичок XXI століття та не в змозі швидко реагувати на зміни, які несе із собою прогрес. На відміну від класичної освіти, навчаючись з допомогою STEM-технологій, здобувач освіти отримує набагато більше свободи міркувань та дій, що дає можливість вчителю об'єктивніше оцінювати досягнення учня. Завдяки цьому дитина вчиться бути самостійною, приймати власні рішення та брати за них відповідальність.

Для проведення STEAM-уроків, виконання проєктів педагога можуть використовувати сучасне обладнання. Наприклад:

1. Автономний набір EdProAmperia (<https://amperia.edpro.ua/>), що покриває 100% лабораторних та демонстраційних робіт з курсу

електрики та магнетизму. Працює у приміщеннях без розеток, блок живлення та вимірювальний прилад містять акумулятор. У комплект входять усі компоненти, необхідні для проведення лабораторних та методичні рекомендації.

2. Arduino CTC Go! – CORE MODULE (<https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-ctc-go-core-module>) – це навчальна програма STEAM, що складається з декількох модулів, які можна комбінувати для викладання STEAM на різних предметах. Ці модулі надають викладачам міждисциплінарну програму, де учні спочатку навчаються використовувати технологію як інструмент, а потім застосовують ці знання на практиці. Навчальні комплекти Arduino Education Starter Kit для вивчення електроніки не вимагають знань із програмування чи електроніки. Arduino Education Science Kit Physics Lab призначені для проведення експериментів з рухом, магнетизмом, провідністю та різними фізичними силами.

Керуючись рекомендаціями державної програми підвищення якості природничо-математичної освіти, можна стверджувати, що є **актуальним** ознайомлення та використання сучасних експериментальних засобів та цифрових лабораторій. Використання цифрових лабораторій дає можливість організувати фізичний експеримент на принципово новому рівні, перейти до елементів наукового пізнання – від якісних оцінок досліджуваних явищ до системного аналізу їх кількісних характеристик. Використання цифрових лабораторій в навчальному експерименті з фізики сприяє підвищенню інтересу до вивчення предмету та формуванню експериментаторської складової частини предметної компетентності. Цифрова лабораторія – це сучасна універсальна комп'ютеризована система, яка використовується для проведення широкого спектру досліджень, демонстрацій, лабораторних робіт з фізики, хімії та біології. Використання цифрових лабораторій дозволяє отримати уявлення про суміжні освітні області, такі як: інформаційні технології; сучасне обладнання; математичні функції і графіки, математична обробка експериментальних даних, статистика, наближені обчислення; методика проведення досліджень, складання звітів, презентація виконаної роботи. У порівнянні із традиційним обладнанням цифрові лабораторії надають можливість:

1) скоротити час, який витрачається на підготовку і проведення фронтального або демонстраційного експерименту;

2) підвищити наочність експерименту та візуалізацію його результатів, розширити список експериментів;

3) з великою точністю обробити і проаналізувати дані експерименту;

4) проводити вимірювання у польових умовах;

5) модернізувати традиційний експеримент;

6) створювати відео демонстраційних експериментів, що дає можливість формувати свій банк наочності;

7) порівнювати дані, отримані у процесі проведення експериментів, та виконувати серйозну статистичну обробку результатів.

Проте є і складнощі, які можуть виникнути під час роботи з цифровою лабораторією:

1) неможливість отримання відповідних графічних залежностей (пов'язано зі значною кількістю вимірювань за одиницю часу), що іноді спотворює зміст одержаних результатів;

2) під час обробки графіків використовуються доволі складні перетворення, які не завжди зрозумілі учням;

3) виникає необхідність у виділенні додаткового часу для пояснення матеріалу, пов'язаного з використанням цифрових лабораторій.

У процесі аналізу відгуків користувачів нами було визначено, що питання методики використання цифрових вимірювальних комплексів у закладах загальної середньої освіти та закладах вищої освіти розроблено не достатньо. Ми пропонуємо використовувати цифрову лабораторію реалізації змішаного навчання. Розглянемо приклад використання цифрового вимірювального комплексу «SKOOLTO» (<https://mirroschool.com/catalog/fizika/cifrovoe-izmeritelnoe-oborudovanie-fofizike>), розробленого Українською компанією «Mirroschool» (<https://mirroschool.com/about>). На відміну від аналогічного обладнання, пропонується варіант має низку переваг: значно нижчу вартість, зручний та зрозумілий україномовний інтерфейс, велику кількість необхідних датчиків, графічну візуалізацію отриманих даних, визначення основних параметрів, їх зберігання, експортування у загальноприйнятні формати (xls, pdf). Ще одна особливість комплексу – можливість під'єднання

до мережі для завантаження результатів експерименту користувачу.

Розглянемо приклад інструкції комплексного виконання дослідження «Закон Гука. Визначення жорсткості пружини». У цьому експерименті використовується датчик сили і датчик відстані для градуювання пружини, для її використання в якості динамометра (рис. 1).



Рис. 1. Установка для визначення жорсткості пружини

Мета роботи – експериментально визначити коефіцієнт жорсткості пружини. Навчитися градуювати пружину і за допомогою отриманої шкали вимірювати сили.

Обладнання та матеріали:

1. Цифровий вимірювальний комплекс SKOOLTO.
2. Датчик сили.
3. Датчик відстані.
4. Кабель.
5. Пружина (~15 Н/м).
6. Набір вантажів масою по 50 г.
7. Лабораторний штатив з муфтою і лапкою.

Підготовка експерименту.

1. Запустіть вимірювальний комплекс SKOOLTO.
2. Підключіть датчик відстані за допомогою з'єднувального кабелю до одного з портів зовнішніх датчиків.
3. Підключіть датчик сили за допомогою з'єднувального кабелю до одного з портів зовнішніх датчиків реєстратора даних.

4. Зберіть експериментальну установку відповідно до запропонованої схеми (див. рис. 1):

- 1) прикріпіть до пружини смужку паперу для градуювання пружини і створення шкали динамометра. Відзначте початкове положення нижнього кінця пружини;

- 2) підвісьте до пружини вантаж масою 100 г;
- 3) переконайтеся, що між підвішеним до пружини вантажем і датчиком відстані немає перешкод.

5. Активуйте датчики.

6. Переконайтеся, що у списку датчиків відзначені галочкою тільки датчик відстані і датчик сили.

7. Встановіть параметри вимірювань в налаштуваннях експерименту:

Датчик відстані	Відстань (м)
Датчик сили	Сила, тяга – додатня (± 10 Н), (Н)
Частота	
Тривалість:	

Виконання експерименту

1. Переконайтеся, що підвішений вантаж знаходиться у стані спокою. Відзначте на папері положення нижнього кінця пружини.

2. Почніть реєстрацію даних. Показання датчика будуть відображатися на екрані у вигляді графіка.

3. Зачекайте 20 с, а потім додайте вантаж масою 50 г, щоб загальна маса становила 150 г. Зачекайте, поки вантаж не буде знаходитися у стані спокою. Відзначте на папері положення нижнього кінця пружини.

4. Зачекайте ще 20 с, потім знову додайте вантаж масою 50 г і дочекайтеся стану спокою. Знову відзначте на папері положення нижнього кінця пружини.

5. Повторюйте пункт 4 і додавайте вантажі по 50 г, поки не досягнете сумарної маси вантажу 500 г.

6. Зупиніть експеримент.

7. Збережіть експеримент.

8. Використовуйте два курсору, щоб визначити видовження пружини після кожного додавання вантажу. Запишіть ці значення в таблицю даних для різних мас вантажів.

Маса вантажу m , г	Сила пружності $F_{пр}$, Н	Видовження тіла Δl , м
-------------------------	--------------------------------	-----------------------------------

Аналіз результатів експерименту

1. Яка була величина сили пружності, коли підвішена маса становила 100 г?

2. Використовуйте дані датчика сили, щоб заповнити другий стовпець у таблиці даних. Запишіть значення сили пружності в ньютонках.

3. Використовуйте дані з датчика відстані, щоб заповнити третій стовпець у таблиці даних. Запишіть видовження в метрах.

4. Побудуйте графік залежності сили пружності від видовження пружини, що проходить через початок координат.

5. Визначте коефіцієнт нахилу прямої

6. Використовуйте графік для розрахунку коефіцієнта жорсткості пружини k .

7. Зніміть пружину зі штатива і проти відміток на папері проставте числа 0; 0,5; 1; 1,5; 2 ... Зверху напишіть «Ньютон».

8. Виміряйте відстань між сусідніми відмітками. Чи однакові вони? Чому?

9. За допомогою проградуєваного динамометра спробуйте виміряти вагу якогось тіла.

В умовах дистанційного навчання експеримент може виконувати учитель і про-

водити відеотрансляцію, використовуючи сервіс Google Meet [<https://meet.google.com/>]. Висновки за результатами виконаної роботи учні надсилають на перевірку, використовуючи сервіс Google Classroom. [<https://classroom.google.com/>].

Висновки і перспективи подальших досліджень. Отже, розроблений та адаптований методичний та технічний інструментарій відповідає виконанню організаційно-методичних вимог в рамках реалізації STEM освіти. Підготовка учнів та студентів за запропонованою нами методикою використання цифрової лабораторії підвищує рівень умінь здійснювати постановку експериментаторської проблеми та шукати шляхи її розв'язання, що забезпечує формування предметної та цифрової компетентності.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Агаманчук П.С., Форкун Н.В. Впровадження елементів STEM-освіти в освітній процес. *Наукові записки Центральноукраїнського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка*. Серія : Педагогічні науки. 2019. Вип. 179. С. 15–24.
2. Бугайчук К.Л. Змішане навчання: теоретичний аналіз та стратегія впровадження в освітній процес вищих навчальних закладів. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2016. Т. 54, № 4. С. 1–18.
3. Валько Н.В. STEM-освіта вчителів у країнах Сходу та Австралії. *Проблеми інженерно-педагогічної освіти*. 2018. № 61. С. 36–47.
4. Валько Н.В. Досвід впровадження STEM-освіти у США та Канаді. *Наукові записки Бердянського державного педагогічного університету*. Сер.: Педагогічні науки. 2018. Вип. 3. С. 9–20.
4. Василяшко І.П., Білик Т.В. Упровадження STEM-навчання – відповідь на виклик часу. *Управління освітою*. Київ, 2017. № 2(386). С. 28–31.
5. Гончарова Н.О. Понятійно-категоріальний апарат з проблеми дослідження аспектів STEM-освіти. *Наукові записки Малої академії наук України: зб. наук. праць*. Київ, 2017. Вип.10. С. 104–114.
6. Іванченко Н.М. Принципи впровадження та переваги STEM-освіти URL: <https://timso.koipro.kr.ua/hmura13/ivanchenko-nataliya-mykolajivna-pryntsyru-vprovadzhennya-ta-perevahy-stem-osvity/> (дата звернення: 06.07.2022).
7. Засоби та обладнання STEM. URL: <https://imzo.gov.ua/stem-osvita/zasobi-ta-obladnannya-stem/> (дата звернення: 08.07.2022).
8. Кузьменко О.С. Сутність та напрямки розвитку STEM-освіти. *Наукові записки. Серія: Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти*. Кіровоград, 2016. Вип. 9. Ч. 3. С. 188–190.
9. Martyniuk, O.O., Martyniuk, O.S., Pankevych, S. and Muzyka, I., 2021. Educational direction of STEM in the system of realization of blended teaching of physics. *Educational Technology Quarterly* [Online], 2021(3), p.1. Available from: <https://doi.org/10.55056/etq.39> [Accessed 29 July 2022].
10. Наказ МОН від 29.02.2016 № 188 «Про утворення робочої групи з питань впровадження STEM-освіти в Україні». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0188729-16#Text>. (дата звернення: 06.07.2022).
11. Про Основні засади розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007–2015 роки : Закон України. *Голос України* від 06.02.2007. № 21.
12. Садовий М.І., Каленчук Е.В., Каленчук А.Т. Підготовка майбутніх учителів фізики, хімії, біології та природничих наук у контексті вимог Нової української школи: *Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Формування предметної компетентності з природничих наук в учнів старшої школи засобами STEM-технологій 20 травня 2021 р.»*, м. Тернопіль. С. 294.
13. Стрижак О.Є., Сліпучіна І.А., Полісун Н.І., Чернецький І.С. Ключові поняття STEM-освіти. *Наукові записки Малої академії наук України : зб. наук. праць*. Київ : Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2017. Вип.10. С. 89–103.
14. STEM-освіта: теорія і практика: анотований каталог / укладачі: С.М. Грицай, С.В. Кода. Суми : НВВ КЗ СОІППО, 2021. 52 с.

REFERENCES:

1. Atamanchuk P. S., Forkun N. V. (2019) Vprovadzheniia elementiv STEM-osvity v osvitnii protses. *Naukovi zapysky Tsentralnoukrainskoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Vynnychenka. Seria : Pedahohichni nauky*. 2019. Vyp. 179. S. 15-24 [in Ukrainian].
2. Buhaichuk K. L. (2016) Zmishane navchannia: teoretychni analiz ta stratehiia vprovadzheniia v osvitnii protses vyshchikh navchalnykh zakladiv. *Informatsiini tekhnologii i zasoby navchannia*. 2016. T. 54, № 4. S. 1-18. [in Ukrainian].
3. Valko N. V. (2018) STEM-osvita vchyteliv u krainakh Skhodu ta Avstralii. *Problemy inzhenerno-pedahohichnoi osvity*. 2018. № 61. S. 36-47. [in Ukrainian].
4. Valko N.V. (2018) Dosvid vprovadzheniia STEM-osvity u SShA ta Kanadi. *Naukovi zapysky Berdianskoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu. Ser.: Pedahohichni nauky*. 2018. Vyp. 3. S. 9-20. [in Ukrainian].
4. Vasylyashko I.P., Bilyk T.V. (2017) Uprovadzheniia STEM-navchannia – vidpovid na vyklyk chasu. *Upravlinnia osvitoiu*. Kyiv, 2017. № 2 (386). S. 28-31. [in Ukrainian].
5. Honcharova N. O. (2017) Poniatiino-katehorialnyi aparat z problemy doslidzhennia aspektiv STEM-osvity. *Naukovi zapysky Maloi akademii nauk Ukrainy: zb. nauk. prats*. Kyiv, 2017. Vyp.10. S. 104-114. [in Ukrainian].
6. Ivanchenko N. M. Pryntsypy vprovadzheniia ta perevahy STEM-osvity URL://timso.koippo.kr.ua/hmura13/ivanchenko-nataliya-mykolajivna-pryntsypy-vprovadzheniia-ta-perevahy-stem-osvity/(data zvernennia: 06.07.2022). [in Ukrainian].
7. Zasoby ta obladnannia STEM. URL: <https://imzo.gov.ua/stem-osvita/zasobi-ta-obladnannia-stem/> (data zvernennia: 08.07.2022). [in Ukrainian].
8. Kuzmenko O. S. (2016) Sutnist ta napriamky rozvytku STEM-osvity. *Naukovi zapysky. Seria: Problemy metodyky fizyko-matematychnoi i tekhnolohichnoi osvity*. Kirovohrad, 2016. Vyp. 9. Ch. 3. S. 188-190. [in Ukrainian].
9. Martyniuk, O.O., Martyniuk, O.S., Pankevych, S. and Muzyka, I., (2021) *Educational direction of STEM in the system of realization of blended teaching of physics. Educational Technology Quarterly [Online]*, 2021(3), p.1. Available from: <https://doi.org/10.55056/etq.39> [Accessed 29 July 2022]. [in English].
10. Nakaz MON vid 29.02.2016 № 188 «Pro utvorennia robochoi hrupy z pytan vprovadzheniia STEM-osvity v Ukraini». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0188729-16#Text>. (data zvernennia: 06.07.2022). [in Ukrainian].
11. Pro Osnovni zasady rozvytku informatsiinoho suspilstva v Ukraini na 2007-2015 roky : Zakon Ukrainy. Holos Ukrainy vid 06.02.2007. № 21. [in Ukrainian].
12. Sadovyi M.I., Kalenchuk E.V., Kalenchuk A.T. (2021) Pidhotovka maibutnikh uchyteliv fizyky, khimii, biolohii ta pryrodnychkykh nauk u konteksti vymoh Novoi ukrainskoi shkoly: *Materialy III Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii «Formuvannia predmetnoi kompetentnosti z pryrodnychkykh nauk v uchniv starshoi shkoly zasobamy STEM-tekhnologii 20 travnia 2021 r. »*, m. Ternopil. S.294. [in Ukrainian].
13. Ctryzhak O.Ie., Slipukhina I.A., Poliusun N.I., Chernetskyi I.S. (2017) Kliuchovi poniattia STEM-osvity. *Naukovi zapysky Maloi akademii nauk Ukrainy : zb. nauk. prats*. Kyiv : Instytut obdarovanoi dytyny NAPN Ukrainy, 2017. Vyp.10. S. 89-103. [in Ukrainian].
14. STEM-osvita: teoriia i praktyka : anotovanyi kataloh / ukladachi: S. M. Hrytsai, S. V. Koda. Sumy : NVV KZ SOIPPO, 2021. 52 s. [in Ukrainian].

УДК 621.315.592

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-5>

Галина МИРОНЧУК

доктор фізико-математичних наук, професор, директор Навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0002-9088-3825

SCOPUS-AUTHOR ID: 36245422900

Тарас МЕЛЬНИЧУК

аспірант, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

Ярослав ЄНДРИКА

доктор інженерії кафедри автоматики, електротехніки і оптоелектроніки, Ченстоховський політехнічний університет, вул. Армії Крайової, м. Ченстохова, Республіка Польща, 42-200

ORCID ID: 0000-0002-7047-6624

SCOPUS-AUTHOR ID: 55053482500

Вайдотас КАЖУКАУСКАС

доктор фізико-математичних наук, професор, головний науковий співробітник групи дослідження фотоелектричних явищ, Інститут фотоніки та нанотехнологій, Вільнюський університет, м. Вільнюс, Литовська Республіка, LT-10257

ORCID: 0000-0002-1198-5373

SCOPUS-AUTHOR ID: 7003516217

Бібліографічний опис статті: Мирончук, Г., Мельничук, Т., Єндрика, Я., Кажукаускас, В. (2022). Оптичні та нелінійно-оптичні властивості кристалів AgGaGeS_4 легованих Er. *Фізика та освітні технології*, 1, 41–47, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-5>

ОПТИЧНІ ТА НЕЛІНІЙНО-ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КРИСТАЛІВ AgGaGeS_4 ЛЕГОВАНИХ Er

У роботі проведено аналіз впливу ширини забороненої зони та середніх розмірів зерен на інтенсивність генерації другої гармоніки кристалів AgGaGeS_4 та AgGaGeS_4 легованого Er. Для оцінки ширини забороненої зони проведено дослідження спектрального розподілу коефіцієнта поглинання в області краю фундаментального поглинання. Оцінена ширина забороненої зони на рівні $\alpha = 350 \text{ см}^{-1}$ при $T=300 \text{ K}$ становить 2,83 та 2,91 eV для AgGaGeS_4 та $\text{AgGaGeS}_4:\text{Er}$ відповідно. Встановлено, що введення рідкоземельного елемента (Er) до AgGaGeS_4 сприяє збільшенню ширини забороненої зони досліджуваної сполуки.

Внаслідок нецентросиметричності кристалічної структури кристали AgGaGeS_4 леговані рідкоземельними металами, викликають інтерес внаслідок потенційного їх використання в електрооптичних та нелінійно-оптичних пристроях. З огляду на це нами проведено дослідження генерації другої гармоніки. Встановлено, що інтенсивність генерації другої гармоніки в легованих кристалах є меншою в порівнянні з такою в нелегованих зразках. Важливим є те, що при збільшенні розміру зерен інтенсивність SGH збільшується як у кристалах AgGaGeS_4 так і в $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Er}$

Отриманий результат свідчить про те, що багатоконпонентні халькогеніди, а саме AgGaGeS_4 та $\text{AgGaGeS}_4:\text{Er}$, є перспективними нелінійно-оптичними матеріалами, оскільки в них поріг лазерного пошкодження є більшим, а нелінійно-оптичний відгук порівняний із комерційно використовуваним AgGaS_2 .

Ключові слова: напівпровідники, оптичне поглинання, генерація другої гармоніки.

Galyna MYRONCHUK

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Director of the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0002-9088-3825

SCOPUS-AUTHOR ID: 36245422900

Taras MELNYCHUK

Postgraduate Student, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

Jaroslaw JEDRYKA

Dr Inz., Department of Automatic Control, Electrical Engineering and Optoelectronics, Częstochowa University Of Technology, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, Poland, 42-200

ORCID ID: 0000-0002-7047-6624

SCOPUS-AUTHOR ID: 55053482500

Vaidotas KAŽUKAUSKAS

Prof. Habil. Dr., Institute of Photonics and Nanotechnology, Vilnius University, Saulėtekio al. 3, Room A324, LT-10257 Vilnius, LITHUANIA

ORCID ID: 0000-0002-1198-5373

SCOPUS-AUTHOR ID: 7003516217

To cite this article: Myronchuk, G., Melnychuk, T., Jedryka, J., Kažukauskas, V. (2022) Optychni ta neliniino-optychni vlastyvoli krystaliv AgGaGeS₄ lehovanykh Er [Optical and non-linear optical properties of Er-doped AgGaGeS₄ crystallites]. *Physics and Educational Technology*, 1, 41–47, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-5>

OPTICAL AND NON-LINEAR OPTICAL PROPERTIES OF Er-DOPED AgGaGeS₄ CRYSTALLITES

The paper analyzes the effect of band gap width and average grain size on the intensity of second harmonic generation of AgGaGeS₄ and Er-doped AgGaGeS₄ crystals. To estimate the band gap, a study of the spectral distribution of the absorption coefficient in the region of the fundamental absorption edge was carried out. The estimated band gap at 350 cm⁻¹ at T=300 K is 2.83 and 2.91 eV for AgGaGeS₄ and AgGaGeS₄:Er, respectively. It was established that the introduction of a rare earth element (Er) to AgGaGeS₄ contributes to an increase in the band gap of the studied compound.

Due to the non-centrosymmetric nature of the crystal structure, AgGaGeS₄ crystals doped with rare earth metals are of interest due to their potential use in electro-optical and nonlinear optical devices. With this in mind, we conducted a study of the generation of the second harmonic. It was established that the intensity of second harmonic generation in doped crystals is lower compared to that in undoped samples. It is important that when the grain size increases, the SGH intensity increases in both AgGaGeS₄ and AgGaGe₃Se₃:Er crystals

The obtained result indicates that multicomponent chalcogenides, namely AgGaGeS₄ and AgGaGeS₄:Er, are promising nonlinear optical materials, as they have a higher laser damage threshold and a nonlinear optical response comparable to commercially used AgGaS₂.

Key words: semiconductors, optical absorption, photoinduced effects, electron-phonon interaction.

Одним із перспективних нелінійно-оптичних (НЛО) матеріалів, який досліджується, є AgGaGeS₄ (AGGS) (Rame Jérémy, Petit Johan etc., 2020; Kasumova, 2013; Ni You-Bao etc., 2008). Кристали AGGS через значне двопронемезаломлення, високу променеву стійкість, відсутність піків поглинання на довжинах

хвиль твердотілих лазерів можуть використовуватися в оптоелектронній техніці для створення параметричних перетворювачів частоти (параметричні генератори світла з накачкою твердотільними лазерами, апконвектори випромінювання CO₂- лазерів у видимий діапазон, подвоювачі частоти) (Rame Jérémy, Petit Johan

etc., 2020). Із 1970-х років у якості нелінійно-оптичних матеріалів практично використовуються AgGaQ_2 ($Q = \text{S, Se}$) (Chemla etc., 1971) та ZnGeP_2 (Boyd, Buehler, Storz, 1971). Проте всім цим кристалам властиві ті чи ті серйозні недоліки. Наприклад, кристали AgGaQ_2 ($Q = \text{S, Se}$) мають низький поріг лазерного пошкодження, а ZnGeP_2 демонструє сильне двофотонне поглинання звичайного 1 мкм (Nd: YAG) або 1,55 мкм (Yb: YAG) джерела лазерного накачування. Тому пошук нових НЛО матеріалів є і досі актуальним. Серед усіх вимог, що ставлять до нових ІЧ нелінійно-оптичних матеріалів, одними з найвагоміших є збільшення порогу лазерного пошкодження та уникнення двофотонного поглинання.

Збільшення променевої стійкості в нелінійних кристалах зазвичай пов'язують зі збільшенням ширини забороненої зони сполук. Багато досліджень зосереджені на включенні в НЛО кристали нелінійно-оптичних активних одиниць, а саме тетраедрів $(\text{Ga/Ge})\text{Q}_4$ ($Q = \text{S, Se}$), що містять халькогени (Bai etc., 2004). Введення рідкоземельних елементів дозволяє збільшити ширину забороненої зони, а щільне розташування мікроскопічних НЛО активних блоків збільшує можливість досягнення великої макроскопічної нелінійно-оптичної відповіді.

Методика експерименту

Кристали для досліджень вирощувались методом Бріджмена-Стокбаргера. Умови отримання монокристалів: температура в зоні кристалізації – 1250 К; температура в зоні відпалу – 720 К; градієнт температури на фоні кристалізації – 5 К/мм; швидкість росту – 0.1 мм/год; час відпалу – 150 год.; швидкість охо-

лодження до кімнатної температури – 5 К/год. Легуючі компоненти Er вводили до складу шихти з розрахунку отримати концентрацію наближену до концентрації вихідних структурних дефектів. Отримані таким чином монокристали представлені на фотографіях (Рис. 1).

Для оцінки оптичної ширини забороненої зони проведено дослідження спектрального розподілу коефіцієнта поглинання. З Ag вмісних кристалів виготовлялись зразки товщиною 0,06-0,1 мм. Пластини були відполіровані в касторовому маслі, що містить надтонкі добавки абразиву (розміром частинок близько 28 мкм) для отримання високоякісних оптичних поверхонь. У якості спектрального приладу використовувався дифракційний монохроматор МДР – 206 з кремнієвим фотодіодом для діапазону 360-1100 нм (спектральний дозвіл 0,2 нм).

Дослідження генерації другої гармоніки проводили за допомогою установки, представленій на рис. 2. У досліді використовували Nd:YAG наносекундний імпульсний лазер з довжиною хвилі 1064 нм як джерело фундаментального випромінювання. Значення енергії плавно змінювали поляризатором Глана. Значення падаючого фундаментального випромінювання вимірювали за допомогою германієвого детектора, а його другу гармоніку – за допомогою фотопомножувача з встановленим інтерференційним фільтром, що пропускає електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі 532 нм (друга гармоніка).

Зразки поміщали на оборотний стіл у спеціальний тримач. Рівні інтенсивності отриманих сигналів основного випромінювання і його другої гармоніки зчитували за допомогою осцилографа Tektronix із частотою 1 ГГц. Таким чином



а) AgGaGeS_4 ;

б) $\text{AgGaGeS}_4:\text{Er}$;

Рис. 1. Фотографії вирощених кристалів

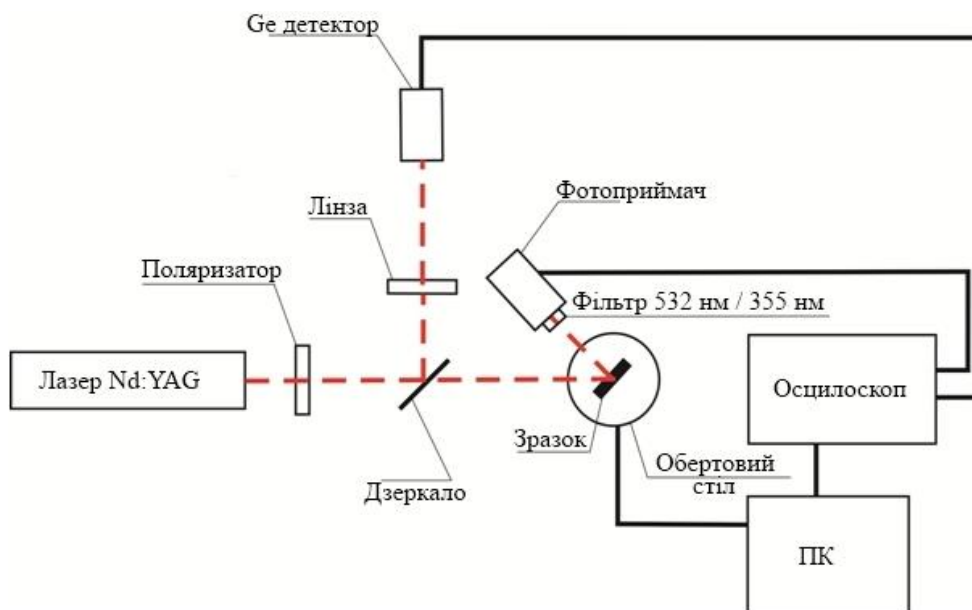


Рис. 2. Вимірювальна система для визначення інтенсивності сигналу другої або третьої гармоніки залежно від застосовуваних фільтрів в результаті опромінення лазерним світлом з довжиною хвилі 1064 нм

фіксувалась залежність генерації гармонік від інтенсивності фундаментального сигналу.

Вимірювання ГДГ виконували за допомогою методики порошку Куртца-Перрі (Kurtz, Perry, 1968). Метод Куртца-Перрі дозволяє давати лише відносну оцінку ефективності нелінійно-оптичних перетворень, при цьому використовується порошок нелінійно-оптичного кристалу. Метод дає можливість досліджувати нові перспективні нелінійно-оптичні матеріали, проте в ньому використовуємо такі наближення: частинки порошку вважаються монокристалами з близькими розмірами до 100 мкм, які хаотично орієнтовані в просторі. Водночас кристаліти рівномірно розподілені між пластинками. Розмір зерен у порошок, що отримані внаслідок механічного дроблення, оцінювали за допомогою скануючого електронного мікроскопа (SEM FEI VERSA 3D). Вони становили 30-100 мкм.

Експериментальні результати та їх обговорення

Область застосування напівпровідників в оптоелектроніці пов'язана з шириною забороненої зони. З огляду на це нами було проведено дослідження спектрального розподілу коефіцієнта поглинання в області краю поглинання (Рис. 3) та оцінена ширина забороненої зони.

Під час розрахунку коефіцієнта поглинання використовувалась формула (Pankove, 1975):

$$T = \frac{(1-R)^2 \exp(-\alpha d)}{1-R^2 \exp(-2\alpha d)}, \quad (1)$$

де α – коефіцієнт поглинання; d – товщина зразка; $T=I/I_0$ – коефіцієнт пропускання; R – коефіцієнт відбивання.

Розв'язок рівняння (1) відносно α має вид:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left\{ \frac{(1-R)^2}{2T} + \sqrt{\left[\frac{(1-R)^2}{2T} \right]^2 + R^2} \right\}. \quad (2)$$

На рис. 3 представлено спектральну залежність коефіцієнта поглинання світла (α) на краю області фундаментального поглинання при $T = 300$ К розрахованого за формулою (2).

Одним із найбільш розповсюджених і ефективних методів оцінки оптичної ширини забороненої зони є метод Тауца (Таус, 1970). Цей метод заснований на припущенні про параболічну форму дисперсії країв валентної зони і зони провідності. У цьому випадку в області краю смуги власного поглинання при $\alpha \geq 10^3 \text{ см}^{-1}$ справедливим є вираз (Pankove, 1975): $(\alpha h\nu)^{1/N} = f(h\nu)$. З останнього співвідношення слідує, що екстраполяція лінійної частини графіка на вісь енергій дозволяє визначити ширину забороненої зони досліджуваного

матеріалу. Слід зауважити, що при вимірюванні спектрів поглинання нам не вдалось отримати значення $\alpha > 1000 \text{ cm}^{-1}$. Це обмеження не дозволило використати метод Тауца для розрахунку E_g . Для оцінки E_g напівпровідників застосовують й інші методи, наприклад, наближене значення E_g при $\alpha < 10^3 \text{ cm}^{-1}$ інколи визначають на деякому фіксованому рівні поглинання (Kodolbas, 2003). Потрібно зауважити, що при вимірюванні спектрів у зразках товщиною 0,06-0,08 мм нам не вдалось отримати коефіцієнт поглинання, який достатній для застосування методу Тауца, у таких випадках значення E_g оцінюють при деякому фіксованому значенні α . Різниця в оцінці ширини забороненої зони обома методами, згідно з літературними даними, складає 3-7% залежно від складу сполуки.

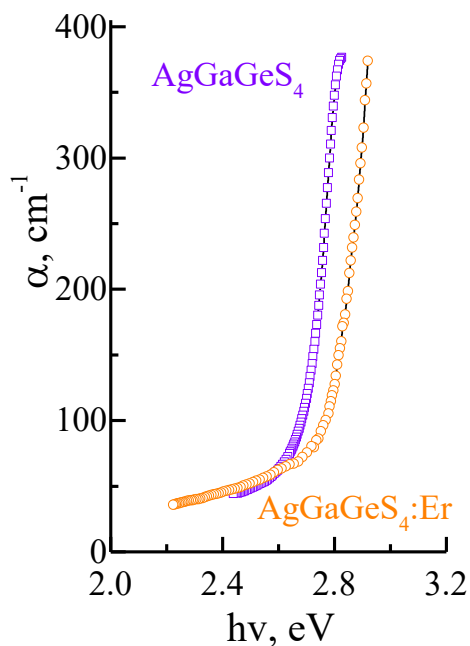


Рис. 3. Спектральний розподіл коефіцієнта фундаментального поглинання

Для порівняння і аналізу отриманих результатів на рис. 3 представлено також спектри поглинання для нелегованих кристалів AgGaGeS_4 . Особливістю структури досліджуваних кристалів є статистичний розподіл катіонів (Ag/Er) по вузлах кристалічної ґратки і наявність в сполуці AgGaGeS_4 нестехіометричних вакансій атомів Ag (V_{Ag}) (Davydyuk, Myronchuk, Lakshminarayana etc., 2012).

Результати оцінки E_g на рівні $\alpha = 350 \text{ cm}^{-1}$ становлять 2,83 та 2,91 eV для AgGaGeS_4 та

$\text{AgGaGeS}_4:\text{Er}$ відповідно. Як видно з отриманих результатів, введення рідкоземельного елемента (Er) до AgGaGeS_4 сприяє збільшенню ширини забороненої зони досліджуваної сполуки. Зменшення ширини забороненої зони досліджуваних сполук на нашу думку пов'язано зі знаком різниць іонних радіусів компонент сполуки та заміщуючого іона ($\text{Er}^{+3}(0.085 \text{ nm}) \rightarrow \text{Ag}^{+}(0.113 \text{ nm})$). Додатковий внесок у зміну ширини забороненої зони можуть також вносити точкові дефекти вакансійного та міжвузлового типів. При введенні атомів із меншим іонним радіусом кристалічна ґратка стискається, що викликає зменшення параметрів решітки. Зміна параметрів решітки призводить до зміни ступеня перекриття електронних оболонок сусідніх атомів і, як наслідок, до зміни ширини забороненої зони. Дане твердження добре узгоджується з експериментами по гідростатичному стиску кристалів, а саме об'ємний гідростатичний тиск призводить до зменшення міжатомної відстані та збільшення E_g . Вплив об'ємного гідростатичного тиску на структурні і електронні властивості халькогенідних кристалів змодельовано в роботах (Brik etc., 2014; Brik etc., 2013).

Внаслідок нецентросиметричності кристалічної структури кристали AgGaGeS_4 леговані РЗМ викликають інтерес внаслідок потенційного їх використання в електрооптичних та нелінійно-оптичних пристроях (Davydyuk, Myronchuk, Lakshminarayana etc., 2012). З огляду на це нами проведено дослідження генерації другої гармоніки. Результати вимірювання ГДГ для досліджуваних зразків представлені на рис. 4.

З аналізу отриманих результатів видно, що інтенсивність генерації другої гармоніки в легованих кристалах є меншою в порівнянні з такою в нелегованих зразках. Аналогічний результат був отриманий для кристалів $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Lu}$ [14]. Важливим є те, що при збільшенні розміру зерен інтенсивність SGH збільшується як у кристалах $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$, так і в $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Er}$ (Рис. 5).

На нашу думку, це може бути спричинено як зміною ширини забороненої зони, так і порушенням густини розподілу заряду, що добре узгоджується з даними роботи (Synthesis, structure, and properties of $\text{Li}_2\text{In}_2\text{MQ}_6$, 2012).

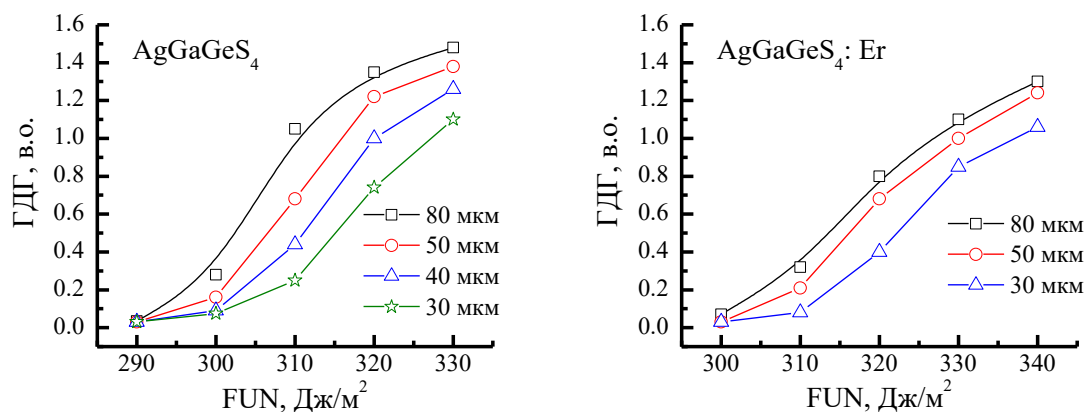


Рис. 4. Залежність інтенсивності генерації другої гармоніки від густини енергії падаючого фундаментального пучка

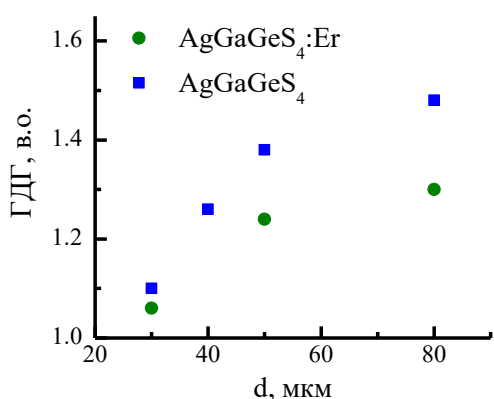


Рис. 5. Залежність інтенсивності генерації другої гармоніки від середніх розмірів зерен кристалічного порошку

Ширина забороненої зони досліджуваних сульфідів є більшою, ніж для еталонних AgGaS_2 (2,64 eV). Через збільшення ширини забороненої зони ці сполуки можуть мати більші пороги лазерного пошкодження в порівнянні з еталонними. Разом із тим інтенсивність сигналу ГДГ для обох сульфідів порівняна з AgGaS_2 , що

і визначає перспективність використання цих сполук.

Висновки

У роботі проведено дослідження кристалів AgGaGeS_4 легованих Er та проведений порівняльний аналіз з нелегованими зразками. Для вивчення можливості використання кристалів $\text{AgGaGeS}_4:\text{Er}$ й розробки на їх основі багатофункціональних матеріалів оптоелектронної техніки досліджено спектральний розподіл коефіцієнта поглинання в області краю фундаментального поглинання. Оцінена ширина забороненої зони на рівні $\alpha = 350 \text{ cm}^{-1}$ при $T=300 \text{ K}$ становить 2,83 та 2,91 eV для AgGaGeS_4 та $\text{AgGaGeS}_4:\text{Er}$ відповідно.

За результатами дослідження генерації другої гармоніки встановлено, що інтенсивність генерації другої гармоніки в легованих кристалах є меншою в порівнянні з такою в нелегованих зразках. Важливим є те, що при збільшенні розміру зерен інтенсивність SGH збільшується як у кристалах $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$, так і в $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8:\text{Er}$.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Rame Jérémy, Petit Johan, Boivin Denis, Horezan Nicolas, Melkonian Jean Michel, Godard Antoine, Viana Bruno. Homogeneity characterization in AgGaGeS_4 , a single crystal for nonlinear mid-IR laser applications. *Journal of Crystal Growth*. 2020. Vol. 54815. 125814.
2. Kasumova Rena J. Second optical harmonic generation of Co2 laser radiation in CGA crystal. *Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials*. 2013. 22(2). 1350023.
3. Ni You-Bao, Wu Hai-Xin, Geng Lei, Wang Zhen-You, Huang Fei, Mao Ming-Sheng, Cheng Gan-Chao. Numerical analysis of infrared nonlinear optical crystal material AgGaGeS_4 in laser experiments. *Rengong Jingti Xuebao/Journal of Synthetic Crystals*. 2008. 37(4). P. 790–794.
4. D. S. Chemla, P. J. Kupecek, D. S. Robertson, R. C. Smith. Silver thiogallate, a new material with potential for infrared devices. *Opt. Commun*. 1971. Vol. 3. P. 29–31.
5. Boyd G. D., Buehler E., Storz F. G. Linear and nonlinear optical properties of ZnGeP_2 and CdSe . *Appl. Phys. Lett*. 1971. Vol. 18. P. 301–304.

6. L. Bai, Z. Lin, Z. Wang, C. Chen, M. H. Lee. Mechanism of linear and nonlinear optical effects of chalcopyrite AgGaX_2 (X=S, Se, and Te) crystals. *J. Chem. Phys.* 2004. Vol. 120. P. 8772–8778.
7. Kurtz S. K., Perry T. T. A powder technique for the evaluation of nonlinear optical materials. *J. Appl. Phys.* 1968. Vol. 39. P. 3798–3813.
8. Pankove J. I. *Optical Process in Semiconductors*. Dover, New York, 1975. P. 35.
9. Tauc J. In *optical properties of solids* / ed. by F. Abeles. Amsterdam, 1970. 277 p.
10. Kodolbas Alp Osman. Empirical calibration of the optical gap in $\text{a-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ ($x < 0.20$) alloys. *Materials Science and Engineering*. 2003. Vol. 98. P. 161–166.
11. G.Ye. Davydyuk, G.L. Myronchuk, G. Lakshminarayana, O.V. Yakymchuk, A.H. Reshak, A. Wojciechowski, P. Rakus, N. AlZayed, M. Chmiel, I.V. Kityk, O.V. Parasyuk. IR-induced features of AgGaGeS_4 crystalline semiconductors. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2012. 73(3). P. 439–443.
12. M. G. Brik, O. V. Parasyuk, G. L. Myronchuk, I. V. Kityk. Specific features of band structure and optical anisotropy of $\text{Cu}_2\text{CdGeSe}_4$ quaternary compounds. *Mater. Chem. Phys.* 2014. Vol. 147, № 1-2. P. 155–161.
13. M. G. Brik, I. V. Kityk, O. V. Parasyuk, G. Myronchuk. Photoinduced features of energy band gap in quaternary $\text{Cu}_2\text{CdGeS}_4$ crystals. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2013. Vol. 25. P. 505802 (11pp).
14. I. V. Kityk, G. L. Myronchuk, M. Lelonek, P. Goring, L. Piskach, B. Vidrynsky, A. Ryzhuk, A. O. Fedorchuk, J. Jedryka. Optoelectronic and non-linear optical properties of Lu-doped $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$ crystallites. *Optical and Quantum Electronics*. 2020. Vol. 52. Article number: 395.
15. Synthesis, structure, and properties of $\text{Li}_2\text{In}_2\text{MQ}_6$ (M = Si, Ge; Q = S, Se): a new series of IR nonlinear / Wenlong Yin, Kai Feng, Wenyu Hao, Jiyong Yao, and Yicheng Wu. *Opt. Mat. Inorg. Chem.* 2012. Vol. 51. P. 5839–5843.

REFERENCES:

1. Rame Jérémy, Petit Johan, Boivin Denis, Horezan Nicolas, Melkonian Jean Michel, Godard Antoine, Viana Bruno. Homogeneity characterization in AgGaGeS_4 , a single crystal for nonlinear mid-IR laser applications. *Journal of Crystal Growth*. 2020. Vol. 54815. 125814. [in English]
2. Kasumova Rena J. Second optical harmonic generation of Co2 laser radiation in CGA crystal. *Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials*. 2013. 22 (2). 1350023. [in English]
3. Ni You-Bao, Wu Hai-Xin, Geng Lei, Wang Zhen-You, Huang Fei, Mao Ming-Sheng, Cheng Gan-Chao. Numerical analysis of infrared nonlinear optical crystal material AgGaGeS_4 in laser experiments. *Rengong Jingti Xuebao/Journal of Synthetic Crystals*. 2008. 37(4), P. 790 – 794. [in English]
4. D. S. Chemla, P. J. Kupecek, D. S. Robertson, R. C. Smith. Silver thiogallate, a new material with potential for infrared devices. *Opt. Commun.* 1971. Vol. 3. P. 29–31. [in English]
5. Boyd G. D., Buehler E., Storz F. G. Linear and nonlinear optical properties of ZnGeP_2 and CdSe . *Appl. Phys. Lett.* 1971. Vol. 18. P. 301–304. [in English]
6. L. Bai, Z. Lin, Z. Wang, C. Chen, M. H. Lee. Mechanism of linear and nonlinear optical effects of chalcopyrite AgGaX_2 (X=S, Se, and Te) crystals. *J. Chem. Phys.* 2004. Vol. 120. P. 8772–8778. [in English]
7. Kurtz S. K., Perry T. T. A powder technique for the evaluation of nonlinear optical materials. *J. Appl. Phys.* 1968. Vol. 39. P. 3798–3813. [in English]
8. Pankove J. I. *Optical Process in Semiconductors*. Dover, New York, 1975. P. 35. [in English]
9. Tauc J. In *optical properties of solids* / ed. by F. Abeles. Amsterdam, 1970. 277 p. [in English]
10. Kodolbas Alp Osman. Empirical calibration of the optical gap in $\text{a-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ ($x < 0.20$) alloys. *Materials Science and Engineering*. 2003. Vol. 98. P. 161–166. [in English]
11. G.Ye. Davydyuk, G.L. Myronchuk, G. Lakshminarayana, O.V. Yakymchuk, A.H. Reshak, A. Wojciechowski, P. Rakus, N. AlZayed, M. Chmiel, I.V. Kityk, O.V. Parasyuk. IR-induced features of AgGaGeS_4 crystalline semiconductors. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2012. 73(3). P. 439–443. [in English]
12. M. G. Brik, O. V. Parasyuk, G. L. Myronchuk, I. V. Kityk. Specific features of band structure and optical anisotropy of $\text{Cu}_2\text{CdGeSe}_4$ quaternary compounds. *Mater. Chem. Phys.* 2014. Vol. 147, № 1–2. P. 155–161. [in English]
13. M. G. Brik, I. V. Kityk, O. V. Parasyuk, G. Myronchuk. Photoinduced features of energy band gap in quaternary $\text{Cu}_2\text{CdGeS}_4$ crystals. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2013. Vol. 25. P. 505802 (11pp). [in English]
14. I. V. Kityk, G. L. Myronchuk, M. Lelonek, P. Goring, L. Piskach, B. Vidrynsky, A. Ryzhuk, A. O. Fedorchuk, J. Jedryka. Optoelectronic and non-linear optical properties of Lu-doped $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$ crystallites. *Optical and Quantum Electronics*. 2020. Vol. 52. Article number: 395. [in English]
15. Synthesis, structure, and properties of $\text{Li}_2\text{In}_2\text{MQ}_6$ (M = Si, Ge; Q = S, Se): a new series of IR nonlinear / Wenlong Yin, Kai Feng, Wenyu Hao, Jiyong Yao, and Yicheng Wu. *Opt. Mat. Inorg. Chem.* 2012. Vol. 51. P. 5839–5843. [in English]

УДК 373.5.015.31:53

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-6>

Юрій МІНАЄВ

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри загальної та прикладної фізики, Запорізький національний університет, вул. Жуковського 66, м. Запоріжжя, Україна, 69600

ORCID ID: 0000-0003-1371-6545

Наталія ТИХОНСЬКА

кандидат педагогічних наук, доцент кафедри загальної та прикладної фізики, Запорізький національний університет, вул. Жуковського 66, м. Запоріжжя, Україна, 69600

ORCID ID: 0000-0002-9331-2091

Денис ШАЛАТОВ

магістрант I курсу спеціальності Середня освіта (Фізика), Запорізький національний університет, вул. Жуковського 66, м. Запоріжжя, Україна, 69600

ORCID ID: 0000-0002-0153-1546

Бібліографічний опис статті: Мінаєв, Ю., Тихонська, Н., Шалатов, Д. (2022). Навчання старшокласників прийомів критичного мислення на прикладі аналізу статті про розрахунок періоду коливань маятника у випадку довільних амплітуд. *Фізика та освітні технології*, 1, 48–55, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-6>

НАВЧАННЯ СТАРШОКЛАСНИКІВ ПРИЙОМІВ КРИТИЧНОГО МИСЛЕННЯ НА ПРИКЛАДІ АНАЛІЗУ СТАТТІ ПРО РОЗРАХУНОК ПЕРІОДУ КОЛИВАНЬ МАЯТНИКА У ВИПАДКУ ДОВІЛЬНИХ АМПЛІТУД

Дана стаття присвячена проблемі розвитку критичного мислення в учнів старшої школи. **Актуальність** проблеми підтверджується збільшенням останнім часом кількості науково-методичних публікацій з цієї теми, закріпленням словосполучення «критичне мислення» в нормативних документах, що стосуються організації освіти в Україні, появою низки дисертаційних досліджень, пов'язаних з розвитком критичного мислення засобами різних навчальних предметів. Безпосередня **мета даної статті** полягає в тому, щоб показати на конкретному прикладі, як знання та навички, отримані на уроках математики, інформатики і фізики, а також на заняттях гуртка закладу позашкільної освіти, можуть ставати знаряддям критичного мислення при аналізі фізичного тексту. Як приклад обрано статтю, опубліковану в науковому журналі.

Новизна нашої розвідки полягає, перш за все, в тому, що нам вдалося знайти доволі вдалу для наших цілей статтю, опубліковану в науковому виданні, яка і стала предметом критичного аналізу на заняттях фізико-математичного гуртка. Унікальність цієї статті в тому, що вона дозволила старшокласникам у реальній ситуації застосувати цілу низку прийомів критичного мислення, з якими вони знайомилися на попередніх заняттях гуртка, використовуючи спеціально сконструйовані вправи. З використанням цих прийомів була проаналізована не лише кінцева формула для періоду коливань, а й одна з ключових проміжних формул. Крім того, гуртківці познайомилися з новими для них прийомами критичного мислення. Найцікавішим було те, що вдалося довести хибність самого методу, який запропонували автори аналізованої статті для виведення формули періоду коливань математичного маятника у випадку довільних амплітуд.

Із проведеного дослідження ми зробили **висновок**, що має сенс продовжувати пошуки опублікованих фізичних текстів, які були б цікавими з точки зору використання їх як методичного матеріалу для навчання старшокласників прийомів критичного мислення на основі інтеграції знань з фізики, математики та інформатики.

Ключові слова: критичне мислення, математичний маятник, амплітуда коливань, період коливань, середня швидкість, середнє значення функції.

Yurii MINAIEV

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at General and Applied Physics Department, Zaporizhzhia National University, 66 Zhukovskoho Street, Zaporizhzhia, Ukraine, 69600

ORCID ID: 0000-0003-1371-6545

Nataliia TIHONSKA

Candidate of Pedagogic Sciences, Associate Professor at General and Applied Physics Department, Zaporizhzhia National University, 66 Zhukovskoho Street, Zaporizhzhia, Ukraine, 69600

ORCID ID: 0000-0002-9331-2091

Denys SHALATOV

Master's student in Secondary Education (Physics), Zaporizhzhia National University, 66 Zhukovskoho Street, Zaporizhzhia, Ukraine, 69600

ORCID ID: 0000-0002-0153-1546

To cite this article: Minaiev, Yu., Tihonska, N., Shalатов, D. (2022). Teaching high school students critical thinking techniques using analysis of an article about calculating the period of pendulum oscillations in the case of arbitrary amplitudes. *Physics and Educational Technology*, 1, 48–55, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-6>

TEACHING HIGH SCHOOL STUDENTS CRITICAL THINKING TECHNIQUES USING ANALYSIS OF AN ARTICLE ABOUT CALCULATING THE PERIOD OF PENDULUM OSCILLATIONS IN THE CASE OF ARBITRARY AMPLITUDES

This article is devoted to the problem of developing critical thinking in high school students. The relevance of the problem is confirmed by the recent increase in the number of scientific and methodical publications on this topic, the consolidation of the phrase “critical thinking” in normative documents related to the organization of education in Ukraine, the appearance of a number of dissertation studies related to the development of critical thinking by means of various educational subjects. The purpose of this article is to show on an example how the knowledge and skills acquired in mathematics, computer science and physics lessons, as well as in extracurricular classes, can become a tool for critical thinking in the analysis of a text on physics. An article published in a scientific journal was chosen as an example.

The novelty of our investigation consists, first of all, in the fact that we managed to find a rather successful article for our purposes, published as a scientific publication, which became the subject of critical analysis in extracurricular classes. The uniqueness of this article is that it allowed high school students in a real situation to apply a number of critical thinking techniques, which they were introduced to in previous classes, using specially designed exercises. Using these techniques, not only the final formula for the oscillation period, but also one of the key intermediate formulae was analyzed. In addition, the students will get to know the techniques of critical thinking that are new to them. The most interesting thing is that it is possible to prove the falsity of the very method proposed by the authors of the analyzed article for deriving the formula for the oscillation period of a mathematical pendulum in the case of arbitrary amplitudes.

From the conducted research, we concluded that it makes sense to continue the search for published texts on physics that would be interesting from the point of view of using them as methodical material for teaching high school students critical thinking techniques based on the integration of knowledge from physics, mathematics, and computer science.

Key words: *critical thinking, mathematical pendulum, amplitude of oscillations, period of oscillations, average velocity, average value of the function.*

Актуальність проблеми. Словосполучення «критичне мислення», як психолого-педагогічний термін, прийшло до України зі Сполучених Штатів Америки (Facione, 1990; Lipman, 1988). У тому, що в Україні визнається актуальність проблеми розвитку у підростаючого покоління критичного мислення, можна переконатися з тексту закону «Про Освіту» (Про Освіту, 2017). Останнім часом розвитку критичного мислення здобувачів освіти присвячуються кандидатські й докторські дисертаційні дослідження. Для прикладу обмежимося посиланням лише на дві захищені в Україні дисертації: одну кандидатську (Цьома, 2020) та одну докторську (Починкова, 2021).

Звернемо увагу на те, що детальний аналіз робіт вітчизняних та зарубіжних психоло-

гів і педагогів, наведений у статті (Даценко, Лозовенко, Мінаєв, 2016), дозволив помітити фактичний збіг у різних дослідників емпіричних характеристик вищого рівня мислення. Відмінність назв для цього рівня мислення (формальне, понятійне, теоретичне, критичне) пов'язана з емпіричним характером проведених досліджень. Приклади прояву критичного та некритичного мислення збігаються з основними емпіричними характеристиками понятійного та допонятійного мислення в теорії Л. Веккера.

Фіксація факту виведення характеристик більш високого рівня мислення з психічної структури поняття дозволяє зробити теоретично більш усвідомленою практичну роботу

зі створення та вдосконалення технології розвитку критичного мислення. Зокрема, з цього випливає, що, крім загальних прийомів критичного мислення, для кожної галузі знань мають існувати свої специфічні. Якщо хтось навчався критичного мислення на матеріалі історії (Терно, 2011), то це не гарантує йому, що він зможе критично мислити в галузі фізики, або навпаки.

Крім того, необхідно враховувати, що в Україні розвитком критичного мислення учнів на матеріалі конкретного навчального предмета вчителі займалися і до того, як відповідний термін набув у нас поширення. Наприклад, у статті (Мінаєв, Тихонська, Циганок, 1999) розповідається про досвід організації роботи учнів з порівняльного критичного аналізу альтернативних підручників фізики. Йшлося про доволі складну тему молекулярної фізики, пов'язану з властивостями реального газу. Під керівництвом учителя старшокласники знайшли шість змістовних помилок у двох параграфах одного з аналізованих підручників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Увага до проблеми розвитку критичного мислення у здобувачів освіти посилилася після поширення відповідного терміна в Україні та закріплення його в офіційних документах, що стосуються освіти. Наведемо лише декілька прикладів, які безпосередньо пов'язані з фізикою як навчальним предметом.

Суть критичного мислення як наскрізного вміння учнів, що формується в процесі навчання різних шкільних предметів, зокрема фізики, розкрито у статті (Ляшенко, Терещук, 2017). Наведено опис найбільш поширених концепцій критичного мислення і структурні компоненти відповідних моделей. У методичному аспекті на прикладі навчання квантової фізики показано можливості реалізації компетентісно орієнтованої технології критичного мислення в навчанні фізики.

У статті (Терещук, Мартинюк, 2021) на підставі проведених досліджень показано, що при вивченні фізики у ліцеї ефективною моделлю розвитку критичного мислення є така, що відповідає гіпотетико-дедуктивному спрямуванню освітнього процесу. Наголошується, що у контексті методології навчання слід замінити індуктивно-емпіричний підхід на гіпотетико-дедуктивний. З'ясовано, що це дозво-

ляє значно покращити результати навчання на уроках фізики в 10-11 класах. Розвиток в учнів навичок критичного мислення надає їм упевненості у власних силах під час виконання STEM-проектів.

Теоретичні та методичні основи організації діяльності учнів з фізики на основі використання технологій критичного мислення в процесі вивчення теми «Основи спеціальної теорії відносності» розкриваються у статті (Сальник, Томашевська, 2017).

Опубліковано статтю, яка присвячена розвитку критичного мислення вчителів фізико-технічного профілю (Орлянський, 2017). Як зазначає автор цієї статті, існує проблема наявності великої кількості помилок у фізичних виданнях різного рівня: від інтернет-видань до рекомендацій МОН України. Помилки з фізики або недбалість при підготовці матеріалів, на думку автора, знижують авторитет фізичної освіти і демотивують студентів. Запропоновано використовувати подібні помилки для розвитку критичного мислення майбутніх учителів фізико-технічного профілю. Важливо, на наш погляд, що це твердження проілюстровано розбором конкретних прикладів.

Зазначимо, що у деяких випадках критичний аналіз різноманітного фізичного контенту спонукає здобувачів фізичної освіти та їхніх наукових керівників до власних досліджень тих проблем, які залишилися невирішеними через помилки, яких припустилися автори аналізованого контенту. Приклади таких досліджень наведено у статтях (Datsenko, Lozovenko, Minaiev, Zadoian, 2019; Мінаєв, Тихонська, Шалатов, 2022; Lozovenko, Minaiev, Lutai, 2022).

Мета нашого дослідження полягала, у першу чергу, в пошуку опублікованої статті з фізичним змістом, щоб вона стала вдалим об'єктом для демонстрації вихованцям фізико-математичного гуртка того, як для аналізу тексту, що містить непомітні для філологів помилки, застосовуються прийоми критичного мислення, які спираються на знання з математики та інформатики. Після знаходження такої статті перед нами постало завдання підготовки та проведення занять гуртка, які були б спеціально присвячені критичному аналізу цієї статті. Вважаємо, що знайомство з матеріалами цих занять було б корисним для вчителів фізики і керівників гуртків відповідного профілю.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Навчання старшокласників прийомів критичного мислення в галузі фізики має включати роботу з уже опублікованими текстами. Якщо йдеться про тексти наукових статей, то доволі складно знайти такі, зміст яких був би зрозумілим навіть для дуже підготовлених старшокласників. У цьому сенсі вдачею було натрапити на статтю (Талалай, Кочетков, Федотов, Талалай, 2016), опубліковану в науковому інтернет-журналі.

Автори зазначеної публікації, серед яких був і доктор технічних наук, стверджували, що вони винайшли формулу періоду коливань маятника, яка містить лише елементарні функції, але її можна застосовувати не тільки для малих амплітуд коливань. У вихованців фізико-математичного гуртка, яким ми про це розповіли, виник природний інтерес, бо у школі вони вивчали формулу періоду математичного маятника, але на лабораторних роботах їх попереджали, що не треба сильно відхиляти нитку маятника, оскільки для великих амплітуд ця формула не працює.

Звернувшись до Вікіпедії, старшокласники дізналися, що зі збільшенням амплітуди період збільшується, але у формулах, які там наводяться, містяться явно не елементарні функції. Виникло запитання: чи автори статті зробили відкриття, яке поки що не знайшло відображення у відомій онлайн-енциклопедії, чи необхідно шукати помилку в тексті статті? Оскільки вихованці фізико-математичного гуртка Запорізького обласного центру науково-технічної творчості учнівської молоді «Грані» були доволі підготовленими з точки зору знання деяких прийомів критичного мислення, ми вирішили присвятити декілька занять критичному аналізу вище згаданої статті. Зазначимо, що ці заняття проводилися в онлайн-режимі, і на них крім старшокласників були присутніми двоє студентів, які навчаються у Запорізькому національному університеті за спеціальністю «Середня освіта (Фізика)».

Перевірка кінцевої формули для періоду коливань маятника на випадок малих амплітуд. Розпочали ми з критичного аналізу кінцевої формули, яку отримали автори зазначеної статті. Вони презентували її як таку, що можна використовувати для знаходження періоду коливань математичного маятника для макси-

мальних кутів відхилення нитки від вертикалі до $\pi/2$ включно:

$$T = \frac{\alpha_{\max} \sqrt{2R}}{\sqrt{g} (\sqrt{1 + \sin \alpha_{\max}} - 1)}. \quad (1)$$

Тут ми зберегли авторське позначення R для довжини нитки.

Вихованці гуртка без проблем могли впевнитися в тому, що з одиницями вимірювання у формулі (1) все в порядку. А чи витримає вона перевірку на випадок малих амплітуд? Значення періоду у цьому випадку мало б збігатися з відомим зі шкільних підручників: $T_0 = 2\pi\sqrt{R/g}$.

Перепишемо формулу (1) у вигляді $T = 2\pi\sqrt{R/g} \cdot \tau(\alpha_{\max})$, де «зведений» період коливань буде такою функцією максимального кута відхилення нитки:

$$\tau(\alpha_{\max}) = \frac{\alpha_{\max}}{\sqrt{2\pi} (\sqrt{1 + \sin \alpha_{\max}} - 1)}.$$

Очевидно, що ця функція мала б прямувати до одиниці за умови, що α_{\max} прямує до нуля. Щоб з'ясувати, чи виправдовується таке очікування, помножимо чисельник та знаменник на вираз $\sqrt{1 + \sin \alpha_{\max}} + 1$, спряжений до того виразу, який у знаменнику стоїть у дужках. Такий крок дозволяє, після застосування у знаменнику однієї з відомих зі шкільної математики формул скороченого множення, без проблем знайти шукану границю для $\tau(\alpha_{\max})$:

$$\lim_{\alpha_{\max} \rightarrow 0} \left(\frac{\alpha_{\max}}{\sin \alpha_{\max}} \cdot \frac{\sqrt{1 + \sin \alpha_{\max}} + 1}{\sqrt{2\pi}} \right) = \frac{\sqrt{2}}{\pi}.$$

Тут ми скористалися тим, що $\sin \alpha_{\max} \approx \alpha_{\max}$ при малих α_{\max} . Як бачимо, виведена авторами аналізованої статті кінцева формула не пройшла перевірку на випадок малих амплітуд. Цікаво було дізнатися, де автори статті, опублікованої у науковому інтернет-журналі, припустилися помилки.

Доведення хибності методу знаходження періоду коливань, запропонованого авторами аналізованої статті. Наведемо цитату з анотації до аналізованої нами статті: «Метод розв'язування, використаний для розв'язування великих коливань маятника, може бути розширеним на будь-які нелінійні коливальні системи. На відміну від наближених методів, що наводяться в сучасній літературі, запропоно-

ваний метод, за наявності вихідної інформації, дозволяє отримати точні розв'язки нелінійних коливань будь-якого типу» (Талалай, Кочетков, Федотов, Талалай, 2016).

У чому ж головна ідея цього методу? Період коливань маятника вчетверо більший за той час, протягом якого кут відхилення нитки від вертикалі збільшується від нуля до α_{\max} . Із цим твердженням складно не погодитися, якщо йдеться про незгасаючі коливання математичного маятника в однорідному гравітаційному полі. Час збільшення кута від нуля до α_{\max} пропонується знаходити, поділивши довжину $R\alpha_{\max}$ дуги, яку проходить тягарець маятника, на його середню швидкість. Здавалося б, все правильно. Щоправда, виникає природне запитання: з яких міркувань знайти середню швидкість?

Для визначення середнього значення швидкості автори аналізованої статті запропонували скористатися добре відомою з курсу математики формулою для середнього інтегрального значення функції:

$$\bar{f} = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx. \quad (2)$$

У розглядуваній ситуації руху тягарця маятника цю математичну формулу (2) було переписано в такому вигляді:

$$v_{\text{ср}} = \frac{1}{\alpha_{\max}} \int_0^{\alpha_{\max}} v(\alpha) d\alpha. \quad (2^*)$$

Ось і вся ідея.

Навіть у тому випадку, якщо б так можна було робити, то не факт, що інтеграл у формулі (2*) для будь-яких нелінійних коливань виражається в елементарних функціях. Отож, сподівання на поширення запропонованого методу, про яке йшлося в анотації до аналізованої статті, одразу мало б сенс поставити під сумнів. Але, як буде показано, необхідно вести мову не про обмеження в поширенні методу на будь-які нелінійні коливання, а про цілковиту його хибність.

Застосуємо головну ідею авторів аналізованої статті щодо середньої швидкості до падіння тіла без початкової швидкості з висоти H із прискоренням g . Очевидно, що час падіння буде дорівнювати $\sqrt{2H/g}$. Але спробуємо знайти час падіння способом, який за своєю ідеєю збігається із запропонованим авторами аналізованої статті.

Для початку виразимо із закону збереження повної механічної енергії залежність швидкості від висоти: $v(h) = \sqrt{2g(H-h)}$. Потім знайдемо «середню» (в лапках) швидкість за формулою, подібною до формули (2*):

$$v_{\text{ср}} = \frac{1}{H} \int_0^H v(h) dh = \frac{\sqrt{2g}}{H} \left[-\frac{2}{3}(H-h)^{\frac{3}{2}} \right]_0^H = \frac{2}{3} \sqrt{2gH}.$$

Насамкінець, отримаємо «час падіння»:

$$\tau = \frac{H}{v_{\text{ср}}} = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{H}{2g}} = \frac{3}{4} \sqrt{\frac{2H}{g}},$$

який, як можна впевнитись, не збігається з очікуваною відповіддю $(\sqrt{2H/g})$.

У чому ж причина? Вона криється в тому, що помилковою є ключова ідея авторів аналізованої статті. Не можна бездумно використовувати математичні формули. У фізиці середня швидкість визначається як $\frac{1}{t_2-t_1} \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt$, де t – це час, а не кут відхилення α , чи висота h , або інша узагальнена координата.

Автори аналізованої статті звертали увагу читачів на те, що формулу для середнього значення швидкості тягарця вони виводили декількома способами. Їхнє твердження про це супроводжувалося посиланням на статтю, яку нам не вдалося знайти, але нещодавно ми відшукали її англійський переклад (Kochetkov, Chelpanov, Fedotov, 2016). Як з'ясувалося, там наведено той самий спосіб, що й у статті, критичний аналіз якої ми проводили з гуртківцями. Ось цей вираз для «середньої» швидкості проходження тягарцем шляху від положення максимального відхилення нитки до точки рівноваги:

$$v_{\text{ср}} = 2\sqrt{2gR} \left(\sqrt{1 + \sin \alpha_{\max}} - 1 \right). \quad (3)$$

Хоча формула для «середньої» швидкості стоїть за один крок від формули для періоду, ми все ж таки вирішили її також використати для відпрацювання у старшокласників прийомів критичного мислення.

Критичний аналіз виразу для середньої швидкості тягарця. Перед тим, як звернутися до формули (3), варто було подумати про вимоги, яким вона мала б задовольняти, якби була правильною. Можна порівняти вираз, апроксимуючий цю формулу у випадку малих коливань, з тим, який нескладно отримати, поділивши шлях $S = 4R\alpha_{\max}$, який проходить

тягарець за період малих коливань, на відоме зі школи значення цього періоду $T_0 = 2\pi\sqrt{R/g}$. Зрозуміло, що збігу цих виразів ми не отримаємо, бо ми вже порівнювати період T_0 з апроксимуючим при малих амплітудах виразом для періоду, обчисленого за формулою (1), яка безпосередньо пов'язана з формулою (3).

Новою є така ідея. Цілком очевидно, що середня швидкість не може бути більшою за максимальну, якої тягарець набуває, коли проходить положення рівноваги. Знайти залежність максимальної швидкості від амплітуди коливань маятника можна без проблем із закону збереження енергії:

$$v_{\max} = \sqrt{2gR(1 - \cos \alpha_{\max})}. \quad (4)$$

За будь-яких значень амплітуди коливань максимальна швидкість тягарця маятника, обчислена за формулою (4), мала б бути більшою за середню швидкість, яка обчислена за формулою (3). Якщо ж знайдеться значення α_{\max} , за якого співвідношення виявиться протилежним, то можна буде стверджувати, що формула (3) для середньої швидкості тягарця є неправильною.

Як показове значення амплітуди можна взяти $\alpha_{\max} = \pi/4$. Нескладно впевнитись, що за формулою (3) маємо $v_{\text{ср}}(\pi/4) \approx 0,61 \cdot \sqrt{2gR}$, а це більше за $v_{\max}(\pi/4) \approx 0,54 \cdot \sqrt{2gR}$, чого не мало би бути. Якщо ж скористатися навичками, отриманими на уроках інформатики, можна побудувати графіки порівнюваних функцій для всього діапазону зміни амплітуди коливань, попередньо звівши їх до безрозмірного вигляду (рис. 1).

Висновки і перспективи подальших досліджень. Завдання навчати старшокласників прийомів критичного мислення є актуальним. У випадку аналізу фізичних текстів помітна частина таких прийомів пов'язана з використанням математики та інформатики. Для розвитку

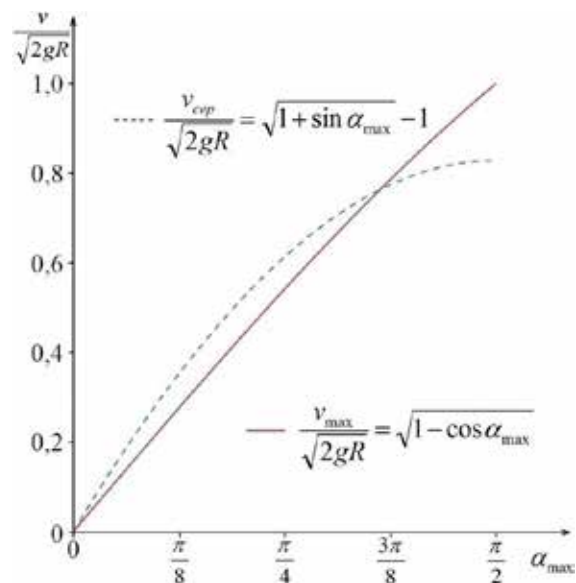


Рис. 1. Наочна демонстрація того, що формула (3) є хибною

критичного мислення учнів виявляється корисним не лише відпрацювання відповідних навичок із застосуванням спеціально розроблених текстів, автори яких ненавмисно припустилися помилок, а рецензенти і редактори з якихось причин цих помилок також не помітили. Не виключенням є тексти статей з фізики, опубліковані у наукових виданнях. Оскільки не так вже часто бувають випадки, коли старшокласникам вистачає власної фізико-математичної освіти, щоб самостійно розібратися зі змістом таких статей, їм потрібна допомога досвідчених дослідників, яка може бути надана на заняттях гуртків закладів позашкільної освіти. Ми вважаємо за потрібне продовжити пошук наукових і науково-методичних статей з фізичним змістом, корисних з точки зору прикладів реальних помилок, яких можна було уникнути, користуючись прийомом критичного мислення.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Даценко І.П., Лозовенко О.А., Мінаєв Ю.П. Критичне і понятійне мислення: чи не є це різними назвами для вищого рівня розвитку мислення? *Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету ім. Івана Огієнка. Серія: Педагогічна.* 2016. Вип. 22. С. 131–134.
2. Ляшенко О.І., Терещук С.І. Критичне мислення як технологія компетентнісного навчання фізики. *Збірник наукових праць Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету ім. Івана Огієнка. Серія: Педагогічна.* 2017. Вип. 23. С. 162–166.
3. Мінаєв Ю.П., Тихонская Н.И., Цыганок М.Н. Углубление знаний о свойствах реальных газов при работе с альтернативными учебниками. *Физика в школе.* 1999. № 5. С. 43–46.
4. Мінаєв Ю.П., Тихонська Н.І., Шалатов Д.С. Організація навчального дослідження залежності періоду коливань математичного маятника від амплітуди: *The XXVI International Scientific and Practical Conference «Problems of science and practice, tasks and ways to solve them».* July 05-08, 2022, Helsinki, Finland. P. 261–267.

5. Орлянський О.Ю. Розвиток критичного мислення учителя фізико-технічного профілю на аналізі помилок у завданнях з фізики. *Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету ім. Івана Огієнка. Серія : Педагогічна.* 2017. Вип. 23. С. 66–70.
6. Починкова М.М. Формування критичного мислення майбутніх учителів початкової школи у процесі професійної підготовки : дис. ... доктора пед. наук : 13.00.04. Старобільськ, 2021. 572 с.
7. Про Освіту : Закон України від 05 вересня 2017 р. № 2145-VIII / *Верховна Рада України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19#Text> (дата звернення: 20.07.2022).
8. Сальник І.В., Томашевська Г.П. Розвиток критичного мислення учнів у процесі вивчення сучасних питань фізики. *Наукові записки. Серія : Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти*. Кропивницький, 2017. Вип. 12(III). С. 129–136.
9. Талалай В.В., Кочетков А.В., Федотов П.В., Талалай М.В. Определение периода больших колебаний маятника (до 90°). *Интернет-журнал «Науковедение»*. Том 8. № 5(2016).
10. Терещук С.І., Мартинюк О.С. Розвиток критичного мислення при вивченні фізики у ліцеї. *Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету ім. Івана Огієнка. Серія : Педагогічна.* 2021. Вип. 27. С. 84–87.
11. Терно С.О. Розвиток критичного мислення старшокласників у процесі навчання історії. Запоріжжя : Запорізький національний університет, 2011. 275 с.
12. Цьбома Н.С. Розвиток критичного мислення майбутніх кваліфікованих робітників у процесі вивчення інформаційних дисциплін : автореф. дис. ... канд. пед. наук : 13.00.04. Суми, 2020. 22 с.
13. Critical Thinking: A Statement of Expert Consensus for Purposes of Educational Assessment and Instruction. Executive Summary «The Delphi Report». By Dr. Peter A. Facione, California Academic Press, 1990.
14. Datsenko I., Lozovenko O., Minaiev Yu. and Zadoian M. Paradoxes of Stiff Springs. *Physics Education*, 2019, 54, 065003.
15. Kochetkov A. V., Chelpanov I. B., Fedotov P. V. Determination of the period of large vibrations of a pendulum in elementary functions. *Measurement Techniques*, Vol. 59, No. 6, September, 2016. P. 610–613.
16. Lipman, M. Critical thinking: What can it be? *Educational Leadership*, 1988. P. 38–43.
17. Lozovenko O., Minaiev Yu., Lutai R. Dzhani-bekov effect in a physics classroom. *Physics Education*, 2022, 57, 015019.

REFERENCES:

1. Datsenko I. P., Lozovenko O. A., Minaiev Yu. P. (2016) Krytychne i ponyatiyne myslennya: chy ne ye tse riznymy nazvamy dlya vyshchoho rivnya rozvytku myslennya? [Critical and concept thinking: if they are just different names for the highest order of thinking?] *Collection of scientific works of the Kamianets-Podilsky Ivan Ohienko National University. Series : Pedagogical.* 22, 131-134. [in Ukrainian].
2. Lyashenko O. I., Tereshchuk S. I. (2017) Krytychne myslennya yak tekhnolohiya kompetentnisnoho navchannya fizyky. [Critical thinking as a technology of competence-based teaching of physics.] *Collection of scientific works of the Kamianets-Podilsky Ivan Ohienko National University. Series : Pedagogical.* 23, 162-166. [in Ukrainian].
3. Minaiev Yu. P., Tikhonskaya N. I., Tsyganok M. N. (1999) Uglubleniye znaniy o svoystvakh real'nykh gazov pri rabote s al'ternativnymi uchebnikami. [Deepening knowledge about the properties of real gases when working with alternative textbooks.] *Fizika v shkole – Physics at school*, 5, 43-46. [in Russian].
4. Minaiev Y. P., Tikhonska N. I., Shalotov D. S. (2022) Orhanizatsiya navchal'noho doslidzhennya zalezhnosti periodu kolyvan' matematychnoho mayatnyka vid amplitudy [Organization of an educational study of the dependence of the oscillation period of a mathematical pendulum on the amplitude] : *The XXVI International Scientific and Practical Conference «Problems of science and practice, tasks and ways to solve them»*, Helsinki, Finland. (pp. 261-267). [in Ukrainian].
5. Orlyanskyi O. Yu. (2017) Rozvytok krytychnoho myslennya uchyatelya fizyko-tekhnichnoho profilyu na analizi pomylok u zavdanniyakh z fizyky. [Development of critical thinking of physico-technological profile teacher using analysis of errors in physics] *Collection of scientific works of the Kamianets-Podilsky Ivan Ohienko National University. Series : Pedagogical.* 23, 66-70. [in Ukrainian].
6. Pochynkova M. M. (2021) Formuvannya krytychnoho myslennya maybutnikh uchytelev pochatkovoyi shkoly u protsesi profesiynoyi pidhotovky. [Formation of critical thinking of future primary school teachers in the process of professional training.] *Candidate's thesis*. Starobilsk, [in Ukrainian].
7. Zakon Ukrayiny «Pro Osvit» [Law of Ukraine «About Education»] (n.d.). zakon.rada.gov.ua. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19#Text> [in Ukrainian].
8. Salnyk I. V., Tomashevskaya G. P. (2017) Rozvytok krytychnoho myslennya uchniv u protsesi vyvchennya suchasnykh pytan' fizyky. [Development of students' critical thinking in the process of studying modern physics issues.]

Naukovi zapysky. Seriya : Problemy metodyky fizyko-matematychnoyi i tekhnolohichnoyi osvity. – Proceedings. Series : Problems of the methodology of physical, mathematical and technological education. Kropyvnytskyi, Vol. 12 (III). 129-136. [in Ukrainian].

9. Talalay V. V., Kochetkov A. V., Fedotov P. V., Talalay M. V. (2016) Opredeleniye perioda bol'shikh kolebaniy mayatnika (do 90°). [Determination of the period of large pendulum oscillations (up to 90°).] *Internet-zhurnal «Naukovedeniye»*. – *Internet journal "Science of science"*. Vol. 8. No 5. [in Russian].

10. Tereshchuk S. I., Martyniuk O. S. (2021) Rozvytok krytychnoho myslennya pry vyvchenni fizyky u litseyi. [Development of critical thinking when studying physics at the lyceum.] *Collection of scientific works of the Kamianets-Podilsky Ivan Ohienko National University. Series : Pedagogical.* 27. P. 84-87. [in Ukrainian].

11. Terno S. O. (2011) Rozvytok krytychnoho myslennya starshoklasnykiv u protsesi navchannya istoriyi. [Development of critical thinking of high school students in the process of learning history.] *Zaporizhzhia : Zaporizhzhia National University*, 275 p. [in Ukrainian].

12. Tsyoma N. S. (2020) Rozvytok krytychnoho myslennya maybutnikh kvalifikovanykh robitnykiv u protsesi vyvchennya informatsiynykh dystsyplin. [Development of critical thinking of future skilled workers in the process of learning informational disciplines]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Sumy, [in Ukrainian].

13. Critical Thinking: A Statement of Expert Consensus for Purposes of Educational Assessment and Instruction. Executive Summary «The Delphi Report». By Dr. Peter A. Facione, California Academic Press, 1990.

14. Datsenko I., Lozovenko O., Minaiev Yu. and Zadoian M. (2019) Paradoxes of Stiff Springs. *Physics Education*, 54, 065003.

15. Kochetkov A. V., Chelpanov I. B., Fedotov P. V. (2016) Determination of the period of large vibrations of a pendulum in elementary functions. *Measurement Techniques*, Vol. 59, 6, 610-613.

16. Lipman, M. (1988) Critical thinking: What can it be? *Educational Leadership*, P. 38-43.

17. Lozovenko O., Minaiev Yu., Lutai R. (2022) Dzhanibekov effect in a physics classroom. *Physics Education*, 57, 015019.

УДК 621.362.1

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-7>

Олексій НОВОСАД

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID: 0000-0002-9433-7776

SCOPUS-AUTHOR ID: 55595635700

Павло ШИГОРІН

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А.В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID: 0000-0003-2396-8041

SCOPUS-AUTHOR ID: 36024496600

Богдан ВЕНГРИН

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри прикладної фізики і наноматеріалознавства, Національний університет «Львівська політехніка», вул. Ст. Бандери 12, м. Львів, Україна, 79013

ORCID: 0000-0003-4071-9506

SCOPUS-AUTHOR ID: 16445102600

Володимир БОЖКО

кандидат фізико-математичних наук, доцент, керівник секції фізики, Нововолинський науковий ліцей Волинської обласної ради, вул. Пирогова, 1, м. Нововолинськ, Волинська область, Україна, 45400

SCOPUS-AUTHOR ID: 6601954311

Олег ШИГОРІН

здобувач вищої освіти другого (магістерського) рівня, спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

Бібліографічний опис статті: Новосад, О., Шигорін, П., Венгрин, Б., Божко, В., Шигорін, О. (2022). Електричні та термоелектричні властивості твердих розчинів $\text{CuIn}_3\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$. *Фізика та освітні технології*, 1, 56–61, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-7>

ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ $\text{CuIn}_3\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$

У роботі досліджувались тверді розчини $\text{CuIn}_3\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ з вмістом 0, 20, 40, 60, 80 і 100 мол.% CdIn_2S_4 . Мета роботи полягала у дослідженні електричних та термоелектричних властивостей твердих розчинів $\text{CuIn}_3\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$. Визначено тип провідності, питому електропровідність, коефіцієнт Зеєбека твердих розчинів $\text{CuIn}_3\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$. Розраховано термоелектричну потужність кристалів $\text{CuIn}_3\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$. Проаналізовано залежності цих параметрів від компонентного складу $\text{CuIn}_3\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$.

Для визначення коефіцієнта Зеєбека використовувалось неодноразово апробоване обладнання та загальновідомі методики досліджень із використанням сучасного програмного забезпечення. Тип провідності сполук $\text{CuIn}_3\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ визначався термоелектричними методами. Для вимірювань опору зразків використовували «Омметр цифровий Щ-34». Дослідження проводились при $T \approx 300$ К.

Наукова новизна результатів визначається сукупністю сформульованих висновків, основні з яких полягають у тому, що: досліджувані сполуки належать до напівпровідників n-типу провідності; усі тверді розчини виявились низькоомними, з питомим опором, значення якого при кімнатній температурі лежить в межах від $4,4 \cdot 10^4$ (Ом·м), для зразків з 0 мол.% CdIn_2S_4 до $6 \cdot 10^5$ (Ом·м), для зразків із 100 мол.% CdIn_2S_4 ; коефіцієнт Зеєбека

в інтервалі температур 290-360 К становив 87, 157, 123, 118, 165, 166 мкВ/К для 100, 80, 60, 40, 20, 0 мол.% CdIn_2S_4 в CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 відповідно; найвище значення термоелектричної потужності мають тверді розчини CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 з вмістом 60 мол.% CdIn_2S_4 . Завдяки високим значенням коефіцієнта Зеєбека дані сполуки є перспективними для виготовлення чутливих термодатчиків. Показано, що, змінюючи компонентний склад CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 , можна змінювати значення коефіцієнта Зеєбека, питомої електропровідності та значення термоелектричної потужності.

Ключові слова: тверді розчини, електропровідність, коефіцієнт Зеєбека, термоелектрична потужність.

Oleksii NOVOSAD

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate professor at Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0002-9433-7776

SCOPUS-AUTHOR ID: 55595635700

Pavlo SHYGORIN

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at Department of A.V. Svidzynskiy's Theoretical and Computer Physics, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0003-2396-8041

SCOPUS-AUTHOR ID: 36024496600

Bohdan VENHRYN

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at Department of Applied Physics and Nanomaterials Science, Lviv Polytechnic National University, 12 Bandery str., Lviv, Ukraine, 79013

ORCID: 0000-0003-4071-9506

SCOPUS-AUTHOR ID: 16445102600

Volodymyr BOZHKO

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Physics Section, Novovolynsk Scientific Lyceum of the Volyn Regional Council, 1 Pyrogova Str., Novovolynsk, Volyn region, Ukraine, 45400

SCOPUS-AUTHOR ID: 6601954311

Oleg SHYGORIN

Student, specialty 105 "Applied physics and nanomaterials", Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

To cite this article: Novosad, O., Shygorin, P., Venhryn, B., Bozhko, V., Shygorin, O. (2022). Elektrichni ta termoelektrychni vlastyvoli tverdykh rozchyniv CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 [Electrical and thermoelectrical properties of CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 solid solutions]. *Physics and Educational Technology*, 1, 56–61, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-7>

ELECTRICAL AND THERMOELECTRICAL PROPERTIES OF CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 SOLID SOLUTIONS

In the article has been investigated solid solutions of CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 with a content of 0, 20, 40, 60, 80 and 100 mol.% CdIn_2S_4 . The purpose of the work was to investigate the electrical and thermoelectric properties of CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 solid solutions. The conductivity type, specific electrical conductivity, Seebeck coefficient of CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 solid solutions were determined. The thermoelectric power of CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 crystals was calculated. The dependence of these parameters on the CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 component composition was analyzed.

To determine the Seebeck coefficient, repeatedly tested equipment and well-known methods of research using modern software were used. The conductivity type of CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 compounds was determined by thermoelectric methods. «Digital ohmmeter III-34» was used to measure the resistance of the samples. The research was conducted at $T \approx 300$ K.

The scientific novelty of the results is determined by the set of formulated conclusions. The main ones are that it was shown for the first time that the compounds CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 belong to n-type semiconductors. All solid solutions turned out to be low-resistivity, with a specific resistance at room temperature ranging from $4.4 \cdot 10^{-4}$ ($\Omega \cdot \text{m}$) for samples with 0 mol.% CdIn_2S_4 to $6 \cdot 10^{-5}$ ($\Omega \cdot \text{m}$) for samples with 100 mol.% CdIn_2S_4 . The Seebeck coefficient in the temperature range 290-360 K was 87, 157, 123, 118, 165, 166 $\mu\text{V}/\text{K}$, for samples with 100, 80, 60, 40, 20, 0 mol.% CdIn_2S_4 , respectively. The highest value of thermoelectric power has CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 solid solutions with a content of 60 mol.% CdIn_2S_4 . Due to the high value of the Seebeck coefficient, these compounds are promising for the manufacture of sensitive thermal sensors. It is shown that by changing the component composition of CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 it is possible to change the value of the Seebeck coefficient, the specific electrical conductivity, and the value of the thermoelectric power.

Key words: solid solutions, specific electrical conductivity, Seebeck coefficient.

Актуальність проблеми. Одним із пріоритетних завдань фізики напівпровідників та напівпровідникового матеріалознавства є розробка нових матеріалів з метою розширення та вдосконалення функціональних можливостей існуючих напівпровідникових електронних елементів та приладів. Серед основних способів вирішення даного завдання є використання нових твердих розчинів на основі багатокомпонентних матеріалів. Дана робота присвячена дослідженню електричних та термоелектричних властивостей твердих розчинів CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 .

Напівпровідникові матеріали CuIn_5S_8 та CdIn_2S_4 та тверді розчини на їх основі використовуються в сучасній напівпровідниковій електроніці та енергетиці. Ці та ряд інших факторів обумовлюють розвиток технологій отримання нових напівпровідникових матеріалів на основі CuIn_5S_8 та CdIn_2S_4 . Відповідно до цього необхідно досліджувати фізичні властивості таких матеріалів з метою вивчення електронних процесів і встановлення закономірностей зміни фізичних параметрів і властивостей для практичного та наукового використання, що визначає актуальність проблеми, яка частково вирішується в даній роботі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З аналізу літературних джерел можна зробити висновки, що сполуки CuIn_5S_8 та CdIn_2S_4 є перспективними для розробки фотоелектроперетворювачів. На їх основі виготовляють гетеропереходи сонячних елементів (Shuangchao Zhao, 2022; Isik, 2016), також знаходять інше використання (Li, 2019; Ling, 2017). В останні роки з'являються повідомлення про CuIn_5S_8 та CdIn_2S_4 як про матеріали перспективні для термоелектричної генерації (Alzahrani, 2021; Rinkle Juneja, 2019). Згідно з (Alzahrani, 2021) для сполук CdIn_2S_4 термоелектрична добротність (ZT) становила 0,74. В роботі (Rinkle Juneja, 2019) розглянуті електричні та термоелектричні вла-

стивості монокристалів AgIn_5S_8 та CuIn_5S_8 . Наднизькі значення решіткової складової коефіцієнта теплопровідності, 0,29 $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ для AgIn_5S_8 та 0,54 $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ для CuIn_5S_8 при $T=1000$ К (Rinkle Juneja, 2019), свідчать про перспективність даних матеріалів для термоелектричної генерації в високотемпературному інтервалі (Rowe, 1995). Особливістю утворення твердого розчину CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 є збільшення об'єму елементарної комірки при зростанні вмісту атомів Cd (Kozar, 2009).

Мета дослідження. Мета дослідження полягала у встановленні термоелектричними методами типу провідності нових твердих розчинів CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 , експериментальному визначенні питомої електропровідності та коефіцієнта Зеебека сполук CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 ; на основі проведених досліджень розрахувати термоелектричну потужність даних матеріалів та провести аналіз залежностей отриманих результатів від компонентного складу монокристалів CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 .

Методика та техніка експерименту. Методика вирощування твердих розчинів CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 , синтез матеріалів та деякі їх кристалографічні параметри представлені в роботі (Kozar, 2009). Тверді розчини CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4 відповідали компонентному складу 0, 20, 40, 60, 80 і 100 мол.% CdIn_2S_4 .

Для досліджень фізичних властивостей виготовляли зразки у формі правильних паралелепіпедів зі злитків, отриманих після вирощування. Поверхні зразків оброблялись шліфуванням та поліруванням алмазними пастами різної зернистості. Середні розміри зразків становили $(8-5) \times (2-1) \times (2-1)$ мм³. З метою уникнення випадкових похибок та неточностей із кожного монокристалічного злитка певного компонентного складу виготовляли 3-5 зразків.

Під час вимірювань значень питомої електропровідності використовували контакти, отримані вплавленням в торцеві грані зразків

чистого індію. Значення питомої електропровідності вимірювали при $T \approx 300\text{K}$. Для вимірювань опору зразків використовували «Омметр цифровий Щ-34». Для того, щоб переконатися, що електричні контакти є симетричними та омічними, досліджувались вольт-амперні характеристики зразків з контактами. Дослідження вольт-амперних характеристик показали, що контакти є нейтральними по відношенню до освітлення.

Для забезпечення омичності електричних контактів під час досліджень термоелектричних властивостей та визначення типу провідності кристалів використовували прижимні контакти, сформовані на основі галій-індієвої евтектики. Дослідження проводились в інтервалі температур 290-360 К. Методика вимірювання та схема установки для визначення коефіцієнта Зеебека та типу провідності описана в (Novosad, 2022).

Виклад основного матеріалу дослідження.

У табл. 1. представлені результати досліджень електричних та термоелектричних властивостей твердих розчинів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ різного компонентного складу.

Термоелектричними методами встановлено, що тверді розчини $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ належать до напівпровідників *n*-типу провідності. Про *n*-тип провідності сполук CuIn_5S_8 та CdIn_2S_4 згадувалось у роботах (Shuangchao Zhao, 2022; Isik, 2016). В (Isik, 2016) повідомлялось про можливість інверсії типу провідності CuIn_5S_8 .

Усі сполуки виявились низькоомними з питомим опором, значення якого при кімнатній температурі лежить в межах від $4,4 \cdot 10^{-4}$ (Ом·м), для зразків з 0 мол.% CdIn_2S_4 , до $6 \cdot 10^{-5}$ (Ом·м), для зразків із 100 мол.% CdIn_2S_4 . У табл. 1. вказані значення питомої електропровідності. На рис. 1 зображено залежність питомої електропровідності твердих $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ від вмісту CdIn_2S_4 . Із представлених даних видно, що

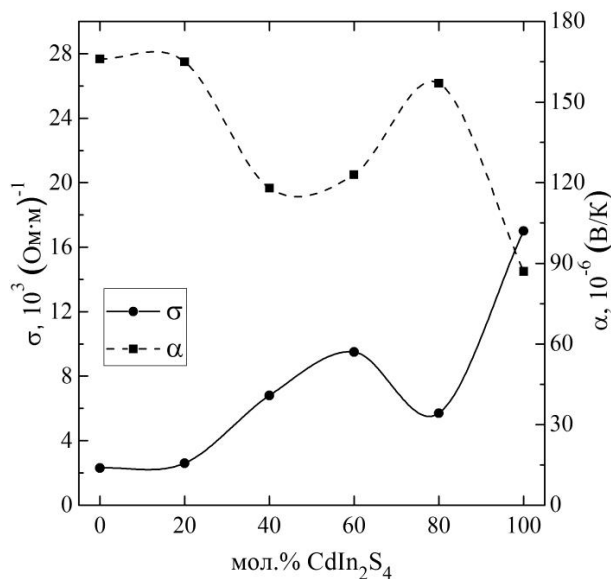


Рис. 1. Залежність питомої електропровідності та коефіцієнта Зеебека твердих розчинів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ від вмісту CdIn_2S_4

зростання вмісту CdIn_2S_4 до 60 мол.% CdIn_2S_4 в $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ призводить до плавного зростання питомої електропровідності твердих розчинів. Різке зменшення питомої електропровідності при вмісті $\approx 60\text{-}80$ мол.% CdIn_2S_4 може обумовлюватись зростанням дефектності кристалічної решітки твердих розчинів даного компонентного складу, що призводить до зменшення рухливості вільних носіїв заряду.

Високе значення коефіцієнта Зеебека $\alpha \approx 86\text{-}166$ мкВ/К (Табл. 1.) дає можливість стверджувати, що тверді розчини $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ можна віднести до матеріалів, перспективних для створення термодатчиків.

На рис. 1 графічно представлено залежність коефіцієнта Зеебека від складу $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$. Особливістю представленої графічної залежності є різке зменшення коефіцієнта Зеебека $\approx 20\text{-}60$ мол.% CdIn_2S_4 . Цей важливий експериментальний факт потребує більш детального

Таблиця 1

Еклектичні та термоелектричні параметри твердих розчинів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$

мол. % CdIn_2S_4	Тип провідності	$\sigma, 10^3 (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$	$\alpha, 10^{-6} (\text{В/К})$	$\alpha^2\sigma, 10^{-4} (\text{Вт/м}\cdot\text{К}^2)$
0	n	2,3	166	0,63
20	n	2,6	165	0,69
40	n	6,8	118	0,95
60	n	9,5	123	1,44
80	n	5,7	157	1,41
100	n	17	87	1,27

аналізу та теоретичного обґрунтування, що буде основою наших подальших досліджень.

Ефективність роботи термоелектрогенераторів визначається термоелектричною добротністю використаних у ньому матеріалів. З (Rowe, 1995) відомо, що термоелектрична добротність визначається формулою:

$$ZT = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\chi} T, \quad (1)$$

де ZT – термоелектрична добротність, α – коефіцієнт Зеебека, σ – питома електропровідність, T – абсолютна температура, χ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу.

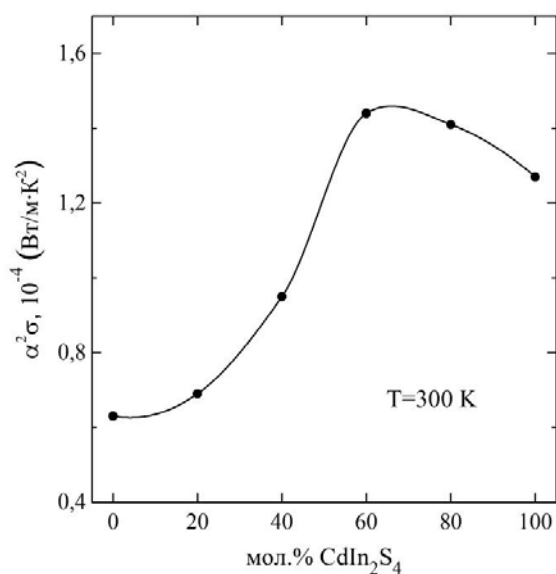


Рис. 2. Залежність термоелектричної потужності твердих розчинів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ від вмісту CdIn_2S_4

У формулі (1) величина $\alpha^2 \cdot \sigma$ – термоелектрична потужність матеріалу. Значення термоелектричної потужності для твердих розчинів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ представлені в табл. 1. На рис. 2 та в табл. 1 представлена залежність $\alpha^2 \sigma$ від складу твердих розчинів $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$. Із цих даних видно, що максимальне значення $\alpha^2 \sigma$ властиве сполукам з $\approx 60\text{-}80$ мол.% CdIn_2S_4 . Очевидно, що це відбувається за рахунок зростання σ та високих значень α . Подібні дослідження проводились для твердих розчинів $\text{AgSbSe}_2\text{-PbSe}$ (Новосад, 2020).

Маючи високі значення термоелектричної потужності, тверді розчини $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ із вмістом $\approx 60\text{-}80$ мол.% CdIn_2S_4 є перспективними для подальших досліджень, зокрема для

визначення χ , аналогічно як це було зроблено в роботі (Новосад, 2021). Знаючи цей параметр, можна буде визначити величину ZT та зробити висновки про придатність $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ для створення термоелектрогенераторів.

Якщо з роботи (Rinkle Juneja, 2019) скористатись значенням $\chi \approx 1$ (Вт/м²К) при $T \approx 300$ для CuIn_5S_8 , то можна оцінити ZT досліджуваних зразків. Такі оцінки показують, що найвище значення $ZT \approx 0,05$ матимуть сполуки з 60-80 мол.% CdIn_2S_4 , проте така оцінка є наближеною та умовною.

Висновки і перспективи подальших досліджень

У результаті проведених досліджень встановлено, що тверді розчини $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ належать до напівпровідників *n*-типу провідності. Коефіцієнт Зеебека при температурах, близьких до кімнатних, становив 166, 165, 118, 123, 157, 87 мкВ/К, для зразків з вмістом 0, 20, 40, 60, 80, 100 мол.% CdIn_2S_4 відповідно. Завдяки високим значенням коефіцієнта Зеебека дані сполуки є перспективними для виготовлення термодатчиків. Монокристали $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ виявились низькоомними з питомим опором, значення якого при кімнатній температурі лежить в межах від $4,4 \cdot 10^{-4}$ (Ом·м), для зразків з 0 мол.% CdIn_2S_4 , до $6 \cdot 10^{-5}$ (Ом·м), для зразків із 100 мол.% CdIn_2S_4 . Показано, що, змінюючи склад $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$, можна змінювати значення коефіцієнта Зеебека, питомої електропровідності та значення термоелектричної потужності.

Слід відмітити, що найвище значення термоелектричної потужності мають тверді розчини $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ з вмістом 60 мол.% CdIn_2S_4 . Залежність властивостей $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ від вмісту CdIn_2S_4 можна використати в напівпровідниковому приладобудуванні. Результати представлених у статті досліджень можуть виявитися корисними в побудові й теоретичному обґрунтуванні моделей електронних процесів в інших складних халькогенідних сполуках.

Остаточного стверджувати про застосовність $\text{CuIn}_5\text{S}_8\text{-CdIn}_2\text{S}_4$ для термоелектричної генерації можна за значеннями коефіцієнта термоелектричної добротності. Тому актуальним залишається вимірювання коефіцієнта теплопровідності. Визначення коефіцієнта теплопровідності та розрахунок термоелектричної добротності стане основою наших майбутніх досліджень.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Shuangchao Zhao, Keyan Li, Jiaming Wu. Metal–Organic Framework-Derived Tubular $\text{In}_2\text{O}_3\text{-C/CdIn}_2\text{S}_4$ Heterojunction for Efficient Solar-Driven CO_2 Conversion. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2022. Vol. 14. P. 20375–20384.
2. Isik M., Gasanly N. Optical characterization of CuIn_5S_8 crystals by ellipsometry measurements. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2016. Vol. 91. P. 13–17.
3. Li, X., Sun, Y., Xu, J. *et al.* Selective visible-light-driven photocatalytic CO_2 reduction to CH_4 mediated by atomically thin CuIn_5S_8 layers. *Nat. Energy*. 2019. № 4. P. 690–699.
4. Ling, C., Ye, X., Zhang, J. *et al.* Solvothermal synthesis of CdIn_2S_4 photocatalyst for selective photosynthesis of organic aromatic compounds under visible light. *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. Article number: 27.
5. Alzahrani, J., Al-Qaisi, S., Mahmood, Q., & Ghrib, T. First Principle Study of Structural, Electronic, and Optical Properties of XIn_2S_4 ($\text{X} = \text{Zn, Cd, Hg}$). *Journal of Materials and Physical Sciences*. 2021. Vol. 2. № 2. P. 69–77.
6. Rinkle Juneja, Abhishek K. Singh Rattling-Induced Ultralow Thermal Conductivity Leading to Exceptional Thermoelectric Performance in AgIn_5S_8 . *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2019. Vol. 11. P. 33894–33900.
7. Rowe D. M., *Handbook of thermoelectrics*. New York, CRC Press, 1995.
8. Kozer V.R., Parasyuk O.V. Phase equilibria in the quasi-ternary system $\text{Cu}_2\text{S-In}_2\text{S}_3\text{-CdS}$. *Chem. Met. Alloys*. 2009. № 2/ P. 102–107.
9. Novosad O., Shygorin P., Bozhko V., Pishova P., Venhryn B., Goldun V. Electrical and Thermoelectrical Properties of PbSe-AgSbSe_2 Monocrystals. *Proceedings of 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, Lviv-Slavske, Ukraine, February 22-26. 2022*. P. 798–801.
10. Новосад О.В., Божко В.В., Федосов С.А., Шигорін П.П. Термоелектричні властивості монокристалів $\text{AgSbSe}_2\text{-PbSe}$. *Перспективні технології та прилади*. 2020. №. 17. С. 183–189.
11. Новосад О., Пішова П., Божко В., Шпак В. Термоелектрична добротність монокристалів $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$. *Фізика та освітні технології*. 2021. №. 1. С. 39–45.

REFERENCES:

1. Shuangchao Zhao, Keyan Li, Jiaming Wu. (2022) Metal–Organic Framework-Derived Tubular $\text{In}_2\text{O}_3\text{-C/CdIn}_2\text{S}_4$ Heterojunction for Efficient Solar-Driven CO_2 Conversion. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 14, 20375–20384 [in English].
2. Isik M., Gasanly N. (2016) Optical characterization of CuIn_5S_8 crystals by ellipsometry measurements. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 91, 13–17 [in English].
3. Li, X., Sun, Y., Xu, J. *et al.* (2019) Selective visible-light-driven photocatalytic CO_2 reduction to CH_4 mediated by atomically thin CuIn_5S_8 layers. *Nat. Energy*. 4, 690–699 [in English].
4. Ling, C., Ye, X., Zhang, J. *et al.* (2017). Solvothermal synthesis of CdIn_2S_4 photocatalyst for selective photosynthesis of organic aromatic compounds under visible light. *Scientific Reports*. 7, 27 [in English].
5. Alzahrani, J., Al-Qaisi, S., Mahmood, Q., & Ghrib, T. (2021) First Principle Study of Structural, Electronic, and Optical Properties of XIn_2S_4 ($\text{X} = \text{Zn, Cd, Hg}$). *Journal of Materials and Physical Sciences*. 2, 69–77 [in English].
6. Rinkle Juneja, Abhishek K. Singh (2019) Rattling-Induced Ultralow Thermal Conductivity Leading to Exceptional Thermoelectric Performance in AgIn_5S_8 . *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 11, 33894–33900 [in English].
7. Rowe D. M. (1995) *Handbook of thermoelectrics*. New York, CRC Press, [in English].
8. Kozer V.R., Parasyuk O.V. (2009) Phase equilibria in the quasi-ternary system $\text{Cu}_2\text{S-In}_2\text{S}_3\text{-CdS}$. *Chem. Met. Alloys*. 2, 102-107 [in English].
9. Novosad O., Shygorin P., Bozhko V., Pishova P., Venhryn B., Goldun V. (2022) Electrical and Thermoelectrical Properties of PbSe-AgSbSe_2 Monocrystals. *Proceedings of 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering* (pp. 798–801). Lviv-Slavske [in English].
10. Novosad O.V., Bozhko V.V., Fedosov S.A., Shygorin P.P. (2020) Termoelektrychni vlastyivosti monokrystaliv $\text{AgSbSe}_2\text{-PbSe}$ [Thermoelectric properties of $\text{AgSbSe}_2\text{-PbSe}$ single crystals]. *Perspektyvni tekhnolohiyi ta prylady – Prospective technologies and devices*. 17. 183–189 [in Ukrainian].
11. Novosad, O., Pishova, P., Bozhko, V. & Shpak, V. (2021) Termoelektrychna dobrotnist monokrystaliv $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$ [Thermoelectric figure of merit in $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$ single crystals]. *Physics and educational technology*, 1, 39–45 [in Ukrainian].

УДК 378

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-8>

Анастасія ОМЕЛЬЧУК

студентка факультету інформаційних технологій і математики, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0001-6442-3940

Леся БУЛАТЕЦЬКА

кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та кібербезпеки, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0002-7202-826X

SCOPUS AUTHOR ID: 8619398600

Віталій БУЛАТЕЦЬКИЙ

кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та кібербезпеки, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0002-9883-4550

SCOPUS AUTHOR ID: 6505910326

Бібліографічний опис статті: Омельчук А., Булатецька Л., Булатецький В. (2022). Огляд поширених хмарних сервісів побудови ER-діаграм для вивчення баз даних. *Фізика та освітні технології*, 1, 62–69, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-8>

ОГЛЯД ПОШИРЕНИХ ХМАРНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ПОБУДОВИ ER-ДІАГРАМ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ БАЗ ДАНИХ

Підготовка сучасних учителів інформатики та IT-фахівців обов'язково повинна включати предмети, пов'язані з удосконаленням базових знань, умінь та навичок з проєктування та розробки баз даних. Для полегшення процесу проєктування баз даних використовуються ER-діаграми, які базуються на поняттях «сутність» і «зв'язок». Діаграма «сутність-зв'язок» дозволяє представити базу даних у вигляді візуальних графічних об'єктів, що визначають конкретну предметну область. У роботі здійснено огляд хмарно-орієнтованих засобів побудови ER-діаграм для проєктування баз даних. Розглянуто можливості застосування таких хмарних сервісів у закладах вищої освіти у підготовці майбутніх учителів інформатики та IT-фахівців. Зручність використання хмарних сервісів полягає в тому, що не вимагає встановлення, налаштування та оновлення програмного забезпечення. Із розглянутих сервісів (Creately, Diagrams.net, Lucidchart, ERDPlus, Dbdesigner.net, QuickDBD, GenMyModel, ToadDataModeler, SQL DBM, Erwin Data Modeler, dbdiagram.io, DrawSQL) було вибрано такі, які дають можливість побудови ER-діаграм у позначеннях Чена, є безкоштовними, мають інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та досить функціоналу для навчання. У цій роботі більш детально розглянуто та проаналізовано можливості доступних хмарних сервісів: Creately, Diagrams.net, Lucidchart, ERDPlus, які дають можливість будувати стандартні компоненти ER-діаграм, підтримують побудову сильних і слабких сутностей, різні типи атрибутів і всі можливі обмеження потужності зв'язків. Крім того, сервіси Diagrams.net, Lucidchart дають можливість спільної роботи над проєктом у режимі реального часу, що дозволяє здобувачам вищої освіти працювати в парах і невеликих групах та формувати навички колективної роботи над навчальними проєктами. Використання хмарних сервісів у сучасній системі освіти сприяє вирішенню проблем доступності, якості навчання та дозволяє вносити в освітній процес нові нестандартні ідеї навчання.

Ключові слова: бази даних, хмарні сервіси, ER-діаграми, освітній процес.

Anastasiia OMELCHUK

Student at the Faculty of Informations Technologies and Mathematics, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0001-6442-3940

Lesia BULATETSKA

PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer Science and Cybersecurity, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0002-7202-826X

SCOPUS AUTHOR ID: 8619398600

Vitalii BULATETSKYI

PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer Science and Cybersecurity, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0002-9883-4550

SCOPUS AUTHOR ID: 6505910326

To cite this article: Omelchuk, A., Bulatetska, L., Bulatetskyi, V. (2022). Ohliad poshyrenykh khmarnykh servisiv pobudovy ER-diahram dlia vyvchennia baz danykh [Review of common cloud services for building ER-diagrams for studying databases]. *Physics and Educational Technology*, 1, 62–69, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-8>

REVIEW OF COMMON CLOUD TOOLS FOR BUILDING ER-DIAGRAMS FOR STUDYING DATABASES

The training of modern informatics teachers and IT specialists must necessarily include subjects related to the improvement of basic knowledge, abilities and skills in the design and development of databases. ER-diagrams, which are based on the concepts of “Entity” and “Relationship”, are used to facilitate the process of designing databases. An “Entity-Relationship” diagram allows you to represent a database in the form of visual graphic objects that define a specific subject area. The article reviews cloud-oriented tools for building ER-diagrams for designing databases. The possibilities of using such cloud services in institutions of higher education during the training of future informatics teachers and IT specialists are considered. The convenience of using cloud services is that it does not require installing, configuring and updating software. From the considered services (Creately, Diagrams.net, Lucidchart, ERDPlus, Dbdesigner.net, QuickDBD, GenMyModel, ToadDataModeler, SQL DBM, Erwin Data Modeler, dbdiagram.io, DrawSQL), those were selected that provide the possibility of constructing ER diagrams in Chen notation, are free, have an intuitive interface and enough functionality for learning. This article examines and analyzes in more detail the possibilities of available cloud services: Creately, Diagrams.net, Lucidchart, ERDPlus, which provide an opportunity to build standard components of ER diagrams, support the construction of strong and weak entities, different types of attributes, and all possible constraints on the strength of ties. In addition, the services Diagrams.net, Lucidchart provide the opportunity to work together on a project in real time, which allows students of higher education to work in pairs and small groups and to form the skills of collective work on educational projects.

Key words: databases, cloud services, ER diagrams, educational process.

Вступ. Перше знайомство з основами проектування баз даних (БД) відбувається у закладах загальної середньої освіти. Значна увага, яка приділяється вивченню систем управління базами даних, пояснюється необхідністю освоєння навичок роботи у сучасних автоматизованих системах обліку і контролю даних. Для здобувачів середньої освіти, які вивчали інформатику в початкових класах, вивчення теми бази даних планується вже в 9-му класі. Розділ «Бази даних» також містить навчальна програма профільного рівня та рівня стандарту вивчення інформатики для 10–11 класів (<https://mon.gov.ua>). Тому підготовка сучасних учителів інформатики обов'язково повинна включати предмети, пов'язані з удосконаленням базових

знань, умінь та навичок з проектування та розробки БД (Єфименко, 2019; Єфименко, 2018), а також методичними особливостям вивчення окремих тем розділу «Бази даних» у закладах загальної середньої освіти (Булатецька, 2020; Шамшина, 2018; Булатецька, 2020; Шамшина, 2016). Крім того, у закладах вищої освіти освітні компоненти, які пов'язані з вивченням баз даних, є обов'язковими у підготовці здобувачів вищої освіти спеціальностей галузі знань 12 «Інформаційні технології», та пропонуються для вивчення як окрема дисципліна.

База даних – це структурована сукупність даних, які відображають стан об'єктів певної предметної області та зв'язки між ними. Розробник бази даних повинен вміти описати

певну предметну область та змодельовати її. Для полегшення процесу проектування бази даних використовується модель «сутність-зв'язок». Модель «сутність-зв'язок» (англ. Entity-relationship model, або entity-relationship diagram) (ER-модель) – модель даних, яка дозволяє описувати концептуальні схеми за допомогою узагальнених конструкцій блоків. Модель «сутність-зв'язок» є простою візуальною моделлю даних, де дані представлені у вигляді компонентів (сутностей), які пов'язані між собою певними зв'язками. На сьогодні відсутній єдиний загальноприйнятий стандарт для моделі «сутність-зв'язок», але є набір загальних конструкцій, що лежать в основі більшості її різновидів. Уперше поняття ER-моделі запровадив П. Чен у роботі (Chen, 1976). Система позначень з цієї роботи отримала назву нотації Чена. Надалі діаграми Чена набули розвитку у багатьох інших роботах з ER-модельовання, що призвело до наявності великої кількості стандартизованих нотацій, способів позначення елементів на діаграмі «сутність-зв'язок», кожна з яких має свої переваги (Буй, 2011). Для нотації Чена є три основні візуальні графічні об'єкти, які використовуються для побудови ER-діаграм: прямокутник (позначає сутності), овал (позначає атрибути) та ромб (позначає зв'язки) (рис. 1).

У разі вивчення основ проектування БД необхідно, щоб майбутні фахівці не лише зрозуміли принципи побудови ER-моделі, а й навчилися розробляти прості проекти. Для навчального процесу важливим є вибір інструменту, який би дозволяв швидко проектувати та редагувати ER-моделі відповідно до потреб. Для побудови ER-діаграм бази даних на логічному та концептуальному рівнях автори роботи (Vakaliuk, 2021) пропонують користуватися інструментами хмарних сервісів. Нині хмарні технології дуже широко використовуються в освіті,

зокрема під час дистанційного навчання (Bulatetska, 2021; Булатецький, 2020; Vakaliuk, 2019; Барладим, 2020; Lytvynova, 2021). Крім того, використання хмарних технологій допомагає зекономити на придбанні програмного забезпечення, тому завдання підбору відповідних хмарних сервісів, які передбачають розв'язання певних функціональних завдань під час підготовки майбутніх учителів з інформатики та IT-фахівців, є досить актуальним (Vakaliuk, 2021; Vakaliuk, 2019). Під час вивчення теми, що стосується ER-модельовання баз даних, потрібно вибрати одну з нотацій. З огляду на те, що в шкільних підручниках (Ривкінд, 2011; Завадський, 2011) використано графічні позначення сутностей і зв'язків, що запропоновані П. Ченом, то під час підготовки майбутніх учителів для ознайомлення варто використати таку нотацію. Під час підготовки майбутніх спеціалістів у галузі знань 12 «Інформаційні технології» можна вести аналогію між різними позначеннями, але для вивчення вибрати одну.

Мета цієї роботи – розглянути та проаналізувати доступні хмарні сервіси для створення ER-діаграм, які дають можливість побудови в позначеннях Чена.

Виклад основного матеріалу дослідження. Якісна підготовка сучасних учителів інформатики значною мірою сприяє модернізації й удосконаленню процесу навчання здобувачів у закладах середньої освіти. Однією з проблем підготовки майбутніх учителів інформатики є впровадження в освітній процес сучасних засобів навчання. Для цього більшість викладачів закладів вищої освіти впроваджують у свої курси інструментарій на основі хмарних технологій. Використання хмарних сервісів має низку переваг: економія засобів на придбання програмного забезпечення, зниження потреби у спеціалізованих приміщеннях, виконання багатьох видів навчальної роботи, еко-



Рис. 1. Графічні об'єкти в ER-діаграмах у нотації Чена

номія дискового простору, безпека та відкритість освітнього середовища для викладачів і для студентів. Для моделювання баз даних є багато видів програмних продуктів. Зазвичай у великих бізнес-проектах використовують платні програмні продукти або підключають спеціальні пакети з додатковими функціями. Проте є багато безкоштовних хмарних сервісів або таких, що мають обмежені можливості за певних умов, але при цьому містять досить функціоналу для навчання. Це такі сервіси, як: Creately, Diagrams.net, Lucidchart, ERDPlus, Dbdesigner.net, QuickDBD, GenMyModel, ToadDataModeler, SQL DBM, Erwin Data Modeler, dbdiagram.io, DrawSQL. Усі ресурси дозволяють легко наочно представляти структуру баз даних і будувати ER-діаграми онлайн. Більшість сервісів дають можливість спільної роботи над проектом, дозволяють генерувати сценарій SQL для різних баз даних та автоматично згенерувати ER-діаграму, маючи SQL сценарій. Але не всі мають можливість будувати ER-діаграму, використовуючи нотацію Чена. У цій роботі розглянуто доступні безкоштовні хмарні сервіси для побудови ER-діаграм, які підтримують нотацію Чена.

Creately (<https://creately.com/>). Такий інструмент для побудови ER-діаграм осна-

щений зручними функціями, які роблять побудову в режимі онлайн дуже простою. Такі функції, як інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, створення елементів одним клацанням миші, інтелектуальні з'єднання, допомагають ефективно спростити процес побудови схем. Для такого сервісу наявні професійно розроблені приклади ER-діаграм, які можна редагувати, тематичні палітри кольорів та стилі для налаштування схем зв'язків між об'єктами (рис. 2).

Diagrams.net (<https://www.diagrams.net>).

Повністю безкоштовний додаток Google із вбудованими діаграмами (рис. 3). Має велику вбудовану бібліотеку шаблонів, інтерфейс з інтуїтивним перетягуванням, експорт у PNG/JPG/XML/SVG/PDF, підтримка сенсорних пристроїв. Однією з переваг цього сервісу є надання можливості спільної роботи над проектом у режимі реального часу. Здобувачі освіти можуть працювати над проектом у парах і невеликих групах. Особливо це стосується проектів, коли предметну область можна розділити на декілька тем. Над кожною темою може працювати окремий користувач, що розробляє ER-модель для окремої теми, яка потім інтегрується у загальну концептуальну модель предметної області.

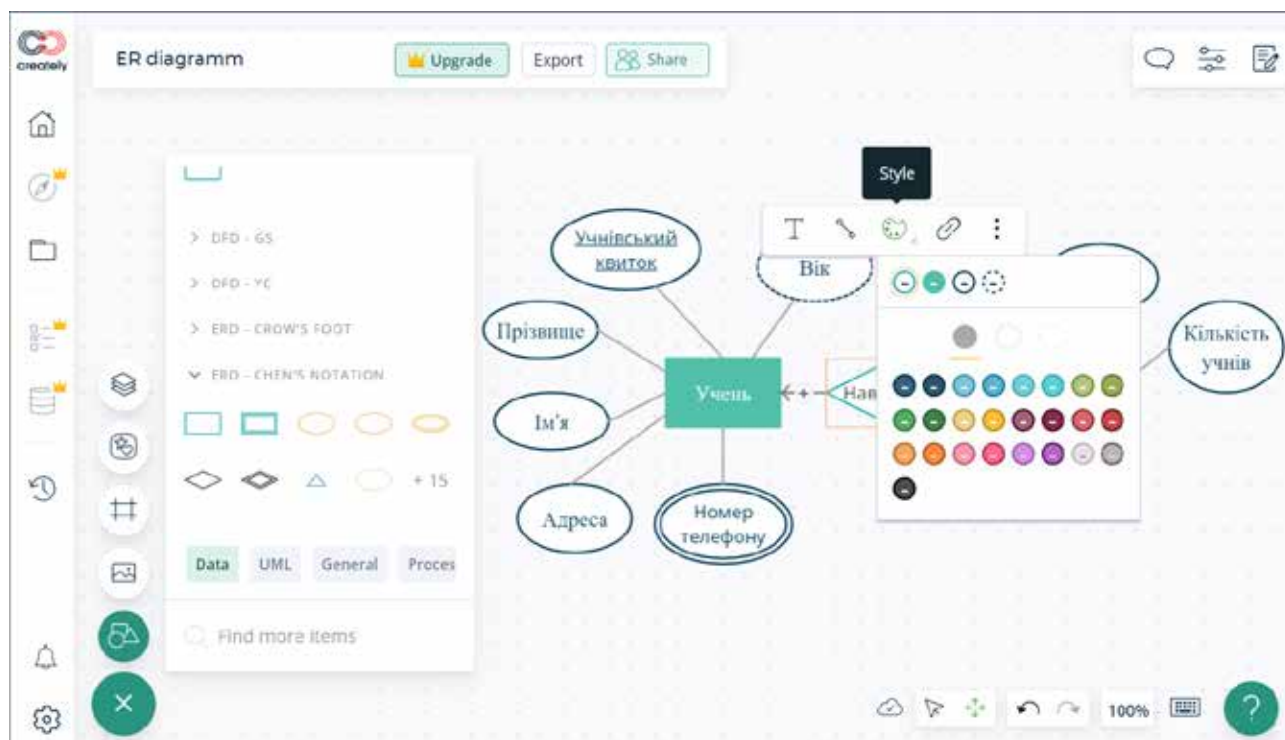


Рис. 2. Середовище моделювання Creately

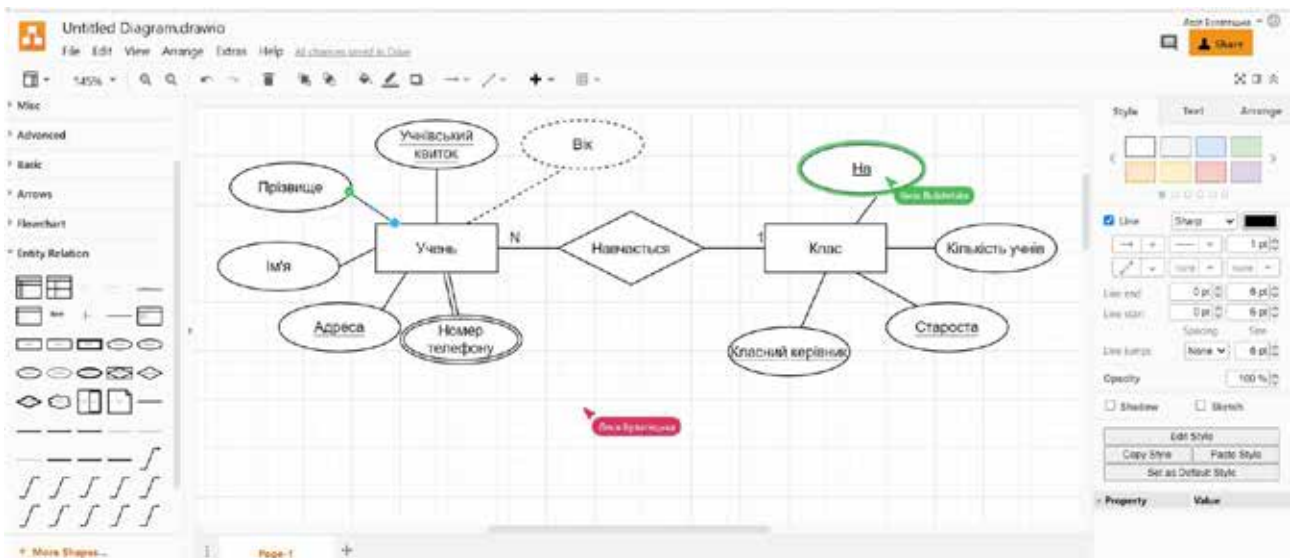


Рис. 3. Середовище моделювання diagrams.net

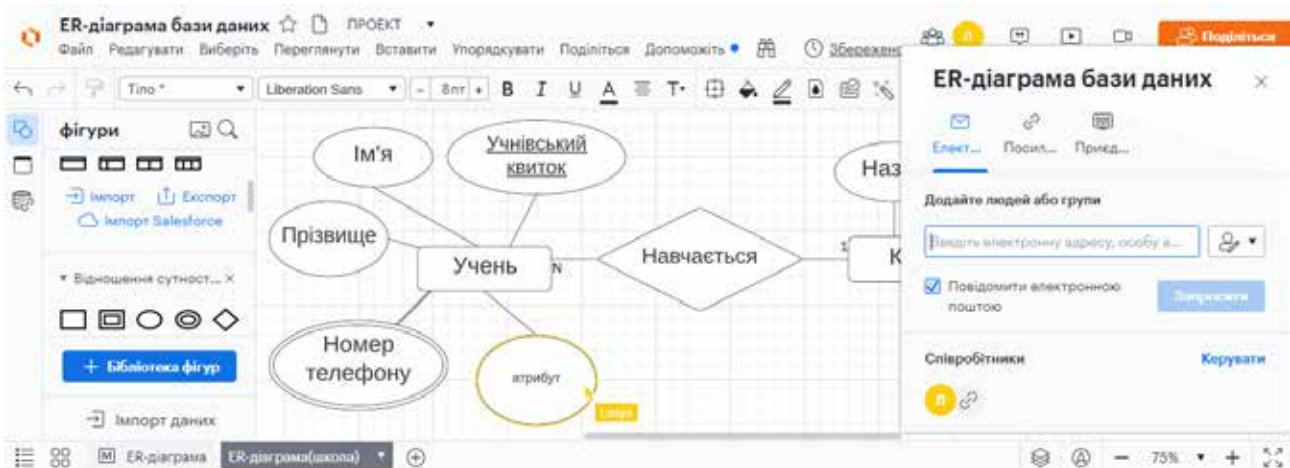


Рис. 4. Середовище моделювання Lucidchart

Під час спільної роботи в режимі реального часу за допомогою diagrams.net є можливість надати доступ до курсора миші. Побачивши курсори членів вашої команди, вам буде легше запитати або пояснити щось на схемі або на швидкому ескізі дошки, коли ви працюєте над проектом разом. Візуальне спостереження за курсором членів команди дає можливість стежити за діями користувачів. Спільна робота в режимі реального часу доступна, якщо файли діаграм збережені у Microsoft OneDrive або на GoogleDisk та налаштовані відповідні дозволи для спільного доступу до файлу діаграми з можливістю редагування.

Курсори на спільних файлах відображаються за замовчуванням. Кожному користувачу, який редагує діаграму, присвоюється колір. Імена користувачів відображаються разом із вказівни-

ком, коли вони переміщуються по diagrams.net та редагують спільну діаграму. Форми та з'єднувачі, які кожен користувач вибирає, будуть виділені призначеним їм кольором (рис. 2).

Lucidchart (<https://www.lucidchart.com>). Це додаток для побудови діаграм, який поєднує у собі створення діаграм, візуалізацію даних та спільну роботу над проектом (рис. 4).

Така послуга теж містить зразки та приклади ER-моделей. Безкоштовна версія включає створення 3 документів (до 60 об'єктів на документ) та доступ до обмеженого набору готових шаблонів (Vakaliuk, 2021;). Також ця послуга допускає збереження готової діаграми у форматах PDF, JPG, PNG. Lucidchart дає можливість спільної роботи над проектом у реальному часі, іменованих курсорів усіх користувачів і коментарів до окремих фігур (рис. 4).

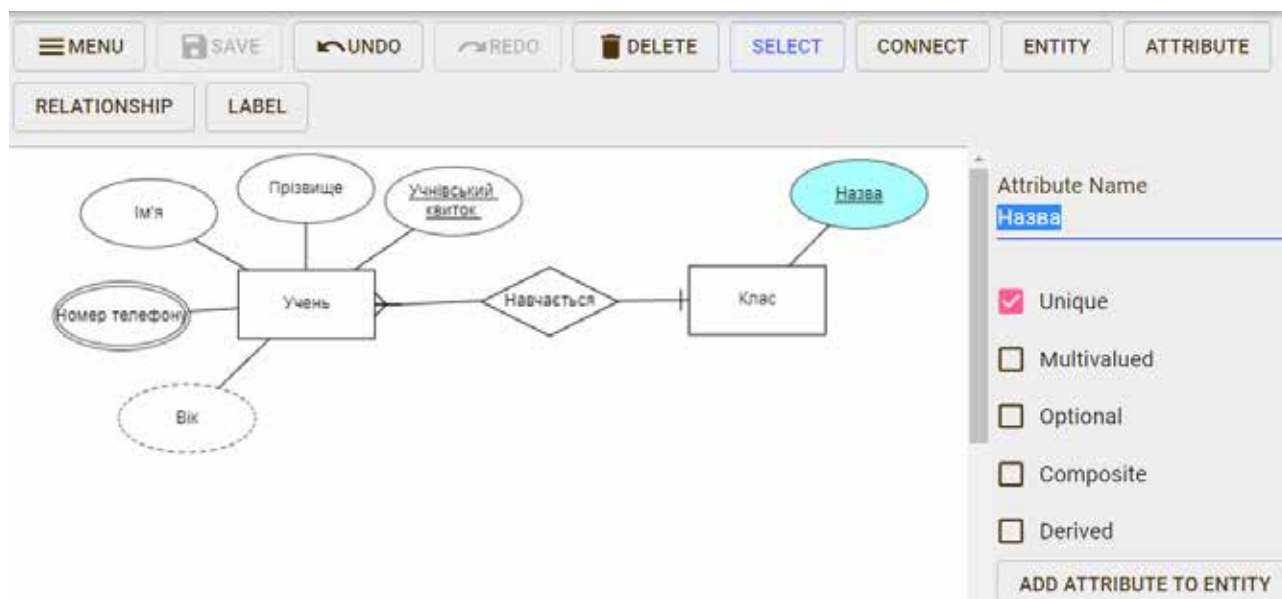


Рис. 5. Середовище моделювання ERDPlus

Якщо у разі побудови використовувати фігури розділу «Відношення сутностей», то побудовану діаграму бази даних можна експортувати у SQL і передати її з Lucidchart до бази даних на вибір користувача. Lucidchart підтримує найбільш поширені платформи СУБД, включаючи MySQL, Oracle, PostgreSQL, і SQL Server.

ERDPlus (<https://erdplus.com>). Дозволяє будувати стандартні компоненти ERD. Нотація підтримує малювання сильних і слабких сутностей, різні типи атрибутів і всі можливі обмеження потужності зв'язків (рис. 5). ERDPlus забезпечує автоматичне перетворення ER-діаграм у реляційні схеми, а з реляційної схеми дозволяє генерувати SQL код. ERDPlus не підтримує спільну роботу над проектом.

Висновки. У цій роботі розглянуто та проаналізовано можливості доступних хмарних сервісів для створення ER-діаграм: Creately, Diagrams.net, Lucidchart, ERDPlus. Такі сервіси дають можливість побудови ER-діаграм у позначеннях Чена, мають інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та наявні професійно розро-

блені приклади ER-діаграм, які можна редагувати. Однією з переваг сервісів Diagrams.net, Lucidchart є можливість спільної роботи над проектом у режимі реального часу. Тому ці сервіси варто використовувати у разі вивчення баз даних у закладах вищої освіти, при цьому формувати навички колективної роботи над проектом у здобувачів вищої освіти. А сервіс ERDPlus можна використовувати у закладах загальної середньої освіти, позаяк він має тільки функціонал, що стосується побудови ER-діаграм та дуже простий і зрозумілий інтерфейс.

Таким чином, важливість впровадження хмарних послуг у підготовку майбутніх учителів інформатики та IT-фахівців сприятиме удосконаленню навчального процесу у разі вивчення дисциплін, що пов'язані з вивченням баз даних. Інструментарій хмарних сервісів дозволяє зекономити на придбанні програмного забезпечення, оскільки під час викладання інформатики в закладах середньої та вищої освіти не накладаються обмеження на використання викладачем різних видів апаратного та програмного забезпечення.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Міністерство освіти і науки України. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya-programu-5-9-klas/onovlennya-12-2017/8-informatika.docx> (дата звернення: 26.06.2022).
2. Міністерство освіти і науки України. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya-programu-10-11-klas/2018-2019/informatika-standart-10-11.docx> (дата звернення: 26.06.2022).
3. Міністерство освіти і науки України. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya-programu-10-11-klas/2018-2019/01/10-11-profilniy-riven.docx> (дата звернення: 26.06.2022).

4. Єфименко В.В. Особливості курсу «Проектування та опрацювання баз даних» для майбутніх учителів інформатики. *Науковий часопис НПУ імені М.П. Драгоманова*. 2019. Серія 2. «Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання», № 21. С. 70–78. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nchnpu_2_2019_21_14.
5. Єфименко В.В. Деякі аспекти навчання курсу «Проектування та опрацювання баз даних» студентів інформатичних спеціальностей. *Науковий часопис НПУ імені М.П. Драгоманова*. 2018. Серія 2. «Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання», 20 (27). С. 113–118.
6. Методичні особливості вивчення концептуального проектування баз даних при підготовці майбутніх фахівців. / Л. Булатецька та ін. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2020. № 41. С. 5–9. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2020-41-01> (дата звернення: 26.06.2022).
7. Булатецька Л., Булатецький В.В. Особливості вивчення мови запитів SQL в профільному курсі інформатики закладів загальної середньої освіти. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2020. № 39. С. 5–10. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2020-39-01> (дата звернення: 26.06.2022).
8. Шамшина Н.В. Методичні особливості вивчення зв'язків та типів об'єднання у базах даних Microsoft Access. *Фізико-математична освіта*. 2018. № 1. С. 339–343.
9. Шамшина Н.В. Об особенностях сохранения информации в базах данных. *Фізико-математична освіта*. 2016. № 4. С. 148–151.
10. Chen P.P. The entity-relationship model – towards a unified view of data. *ACM Transactions on Database Systems*. 1976. Vol. 1, No. 1. P. 9–36.
11. Буй Д.Б., Сільвейструк Л.М. Формалізація моделі «сутність-зв'язок»: монографія. Київ: Київ. ун-т, 2011. 175 с.
12. Vakaliuk T.A., Korotun O.V., Semerikov S.O. The selection of cloud services for ER-diagrams construction in IT specialists databases teaching. *Proceedings of the 8th Workshop on Cloud Technologies in Education (CTE 2020)*, Kryvyi Rih, 18 December 2020 / ed. by S.O. Semerikov, M.P. Shyshkina. 2021. P. 384–397. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2879/paper21.pdf>.
13. Operation system features and cloud services for lecturer work / L.V. Bulatetska et al. *Proceedings of the 8th Workshop on Cloud Technologies in Education*, Kryvyi Rih, 18 December 2020 / ed. by S. O. Semerikov, M.P. Shyshkina. 2021. P. 274–286. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2879/paper14.pdf>.
14. Булатецький В., Булатецька Л., Павленко Ю. Організація робочого місця викладача засобами операційної системи та хмарних сервісів. *Computer-integrated technologies: education, science, production*. 2020. № 40. С. 5–9. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2020-40-01> (дата звернення: 26.06.2022).
15. Vakaliuk T.A., Korotun O.V., Antoniuk D.S. Добір хмаро-орієнтованих засобів навчання баз даних майбутніх фахівців з інформаційних технологій. *Information Technologies and Learning Tools*. 2019. Т. 71, № 3. С. 154. URL: <https://doi.org/10.33407/itlt.v71i3.2880> (дата звернення: 26.06.2022).
16. Використання сервісів адаптивних хмаро-орієнтованих систем у діяльності вчителя / В. Барладим та ін.; ред. М.П. Шишкіна. Київ: Пед. думка, 2020. 148 с. URL: <https://lib.iitta.gov.ua/723149/>.
17. Lytvynova S. Tools and services of cloud-oriented open science systems for lyceum teachers professional development. *Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series: "Pedagogy. Social Work"*. 2021. № 1(48). С. 225–230. URL: <https://doi.org/10.24144/2524-0609.2021.48.225-230> (дата звернення: 26.06.2022).
18. Інформатика: підручник для 11 кл. загальноосвітніх навчальних закладів: академ. рівень, профільн. рівень. / Й. Ривкінд та ін.; ред. М.З. Згуровський. Київ: Генеза, 2011. 304 с.
19. Завадський І. Основи баз даних: навчальний посібник. Київ: Вид. І.О. Завадський. 2011. 192 с.
20. Creately | Visual Tools to Get Things Done | Connect People, Docs, Projects and Data. | Creately. *Creately | Visual Tools to Get Things Done | Connect People, Docs, Projects and Data. | Creately*. URL: <https://creately.com/> (дата звернення: 26.06.2022).
21. Diagram Software and Flowchart Maker. *Diagram Software and Flowchart Maker*. URL: <https://www.diagrams.net> (дата звернення: 26.06.2022).
22. Intelligent Diagramming | Lucidchart. *Lucidchart*. URL: <https://www.lucidchart.com> (дата звернення: 26.06.2022).
23. ERDPlus. *ERDPlus*. URL: <https://erdplus.com> (дата звернення: 26.06.2022).

REFERENCES:

1. Ministry of Education and Science of Ukraine. (n.d.). *Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy*. Retrieved from: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/programy-5-9-klas/onovlennya-12-2017/8-informatika.docx> [in Ukrainian].
2. Ministry of Education and Science of Ukraine. (n.d.). *Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy*. Retrieved from: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/programy-10-11-klas/2018-2019/informatika-standart-10-11.docx> [in Ukrainian].

3. Ministry of Education and Science of Ukraine. (n.d.). *Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy*. Retrieved from: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/programy-10-11-klas/2018-2019/01/10-11-profilniy-riven.docx> [in Ukrainian].
4. Yefymenko, V.V. (2019). Osoblyvosti kursu “Proektuvannya ta opratsyuvannya baz danykh” dlya maybutnikh vchyteliv informatyky. *Naukovyy zhurnal NPU imeni M.P. Drahomanova, Seriya 2. “Komp’yuterno-oriyentovani systemy navchannya”*, (21), 70–78. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nchnpu_2_2019_21_14 [in Ukrainian].
5. Yefymenko, V.V. (2018). Deiaki aspekty navchannia kursu “Proektuvannya ta opratsyuvannya baz danykh” studentiv informatychnykh spetsialnostei. *Naukovyi chasopys NPU imeni M.P. Drahomanova. Seria 2. “Kompiuter-oriiient. systemy navchannia”*, 20 (27). S. 113–118 [in Ukrainian].
6. Bulatetskaya, L., Bulatetsky, V., Pavlenko, Y., Sobchuk, O., & Hayday, S. (2020). Methodological features of studying the conceptual design of databases in the training of future professionals. *Computer-integrated technologies: education, science, production*, (41), 5–9. Retrieved from: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2020-41-01> [in Ukrainian].
7. Bulatetska, L., & Bulatetsky, V. (2020). Features of studying the language of SQL queries in the profile course of informatics of institutions of general secondary education. *Computer-integrated technologies: education, science, production*, (39), 5–10. Retrieved from: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2020-39-01> [in Ukrainian].
8. Shamshyna, N. (2018). Metodychni osoblyvosti vyvchennia zviazkiv ta typiv obiednannia u bazakh danykh Microsoft Access. *Fizyko-matematychna osvita*, (1), 339–343 [in Ukrainian].
9. Shamshyna, N. (2018). Metodychni osoblyvosti vyvchennia zv'yazku ta typiv ob'yednannia v bazakh danykh Microsoft Access. *Fizyko-matematychna osvita*, (1), st.15 [in Ukrainian].
10. Chen, P.P. (1976). The entity-relationship model – towards a unified view of data. *ACM Transactions on Database Systems*, 1(1), 9–36 [in English].
11. Buy, D.B., & Sil'veystruk, L.M. (2011). *Formalizatsiya modeli “sutnist'-zv'yazok”*. Kyiv: Kyiv universytet [in Ukrainian].
12. Vakaliuk, T.A., Korotun, O.V., & Semerikov, S.O. (2021). The selection of cloud services for ER-diagrams construction in IT specialists databases teaching. In S.O. Semerikov & M.P. Shyshkina (Eds.), *Proceedings of the 8th Workshop on Cloud Technologies in Education (CTE 2020)* (pp. 384–397). CEUR Workshop Proceedings 2879. Retrieved from: <http://ceur-ws.org/Vol-2879/paper21.pdf> [in English].
13. Bulatetska, L.V., Bulatetskyi, V.V., Hryshanovych, T.O., Pavlenko, Y.S., Cheprasova, T.I., & Pikilnyak, A.V. (2021). Operation system features and cloud services for lecturer work. In S.O. Semerikov & M.P. Shyshkina (Eds.), *Cloud Technologies in Education (CTE 2020)* (pp. 274–286). CEUR Workshop Proceedings 2879. Retrieved from: <http://ceur-ws.org/Vol-2879/paper14.pdf> [in English].
14. Bulatetskyi, V., Bulatetska, L., & Pavlenko, Y. (2020). Organization of the teacher’s workplace by means of the operating system and cloud services. *Computer-integrated technologies: education, science, production*, (40), 5–9. Retrieved from: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2020-40-01> [in Ukrainian].
15. Vakalyuk, T.A., Korotun, O.V., Antonyuk, D.S. (2019). Dobir khmaro-oriyentovanykh zasobiv navchannya baz danykh maybutnikh fakhivtsiv z informatsiynykh tekhnolohiy. *Informatsiyni tekhnolohiyi ta zasoby navchannya*, 71(3), 154. Retrieved from: <https://doi.org/10.33407/itlt.v71i3.2880> [in Ukrainian].
16. Barladym, V., Beridze, K., Bruyaka, A., Horbachenko, S., Kovalenko, V.V., Nosenko, YU., Mar'yenko, M., Semerikov, S., Shyshkina, M. (2020). *Vykorystannya servisiv adaptyvnykh khmar oriyentovanykh system u diyal'nosti vchytelya* (M.P. Shyshkina (Red.). Pedahohichna dumka. Retrieved from: <https://lib.iitta.gov.ua/723149/> [in Ukrainian].
17. Lytvynova, S. (2021). Tools and services of cloud-oriented open science systems for lyceum teachers professional development. *Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series: “Pedagogy. Social Work”*, (1(48)), 225–230. Retrieved from: <https://doi.org/10.24144/2524-0609.2021.48.225-230> [in Ukrainian].
18. Ryvkind, Y., Lysenko, T., Chernikova, L., & Shakot'ko, V. (2011). *Informatyka* (M.Z. Zhurovs'kyi (Red.). Heneza [in Ukrainian].
19. Zavads'kyi, I. (2011). *Osnovy bazy danykh*. Vydavets' I.O. Zavads'kyi [in Ukrainian].
20. *Creately | Visual Tools to Get Things Done | Connect People, Docs, Projects and Data.* | Creately. (n.d.). Creately | Visual Tools to Get Things Done | Connect People, Docs, Projects and Data. | Creately. Retrieved from: <https://creately.com> [in English].
21. *Diagram Software and Flowchart Maker*. (n.d.). Diagram Software and Flowchart Maker. Retrieved from: <https://www.diagrams.net> [in English].
22. *Intelligent Diagramming | Lucidchart*. (n.d.). Lucidchart. Retrieved from: <https://www.lucidchart.com> [in English].
23. *ERDPlus*. (n.d.). ERDPlus. Retrieved from: <https://erdplus.com> [in English].

УДК 538.9

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-9>**Мирон РУДИШ**

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник кафедри загальної фізики, Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. Драгоманова 19, м. Львів, Україна, 79000; Навчально-науковий фізико-технологічний інститут, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025; кафедра теоретичної фізики, Гуманітарно-природничий університет імені Яна Длугоша в Ченстохові, ал. Армії Крайової 13/15, м. Ченстохова, Польща, 42-200; кафедра загальної фізики, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери 12, м. Львів, Україна, 79000.

ORCID ID: 0000-0002-5431-5652**SCOPUS-AUTHOR ID:** 55858314300**Галина МИРОНЧУК**

доктор фізико-математичних наук, професор, директор навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0002-9088-3825**SCOPUS-AUTHOR ID:** 36245422900**Оксана РУДИШ**

вчитель фізики, Братковицький ЗСО І-ІІ ст. вул. Шкільна 33, с. Братковичі, Україна, 81524

ORCID ID: 0000-0002-3544-3093

Бібліографічний опис статті: Рудиш, М., Мирончук, Г., Рудиш, О. (2022). Анізотропія пружних та акустичних властивостей кристалів AgGaTe_2 . *Фізика та освітні технології*, 1, 70–78, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-9>

АНІЗОТРОПІЯ ПРУЖНИХ ТА АКУСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КРИСТАЛІВ AgGaTe_2 ¹

У рамках теорії функціоналу густини з використанням програми CASTEP, що базується на методі псевдопотенціалу з базисом плоских хвиль блохівського типу, проведено першопринципні обрахунки пружних властивостей кристала AgGaTe_2 . Отримано повну матрицю коефіцієнтів пружної жорсткості C_{ij} з використанням узагальненого градієнтного наближення як обмінно-кореляційний функціонал. Показано, що розраховані коефіцієнти пружної жорсткості задовольняють критерій Борна стабільності матеріалу для тетрагональної симетрії. Коефіцієнти пружної жорсткості використано для оцінки лінійної стисливості k_a і k_c вздовж осі a та c , відповідно. Розраховані значення стисливості є такими: $k_a = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ ГПа}^{-1}$ та $k_c = 10,3 \cdot 10^{-3} \text{ ГПа}^{-1}$, для a та c напрямків, відповідно. Звідси об'ємна стисливість для кристала AgGaTe_2 становить $k = 28,1 \cdot 10^{-3} \text{ ГПа}^{-1}$. Показано, що досліджуваний кристал володіє значною анізотропією пружних властивостей. Проведено аналіз анізотропії з метою її кількісної та якісної оцінки. Розраховано універсальний індекс анізотропії A^U , який характеризує анізотропію як модуля стиску кристала так і анізотропію модуля зсуву. Для кристала AgGaTe_2 універсальний індекс анізотропії рівний 1,015, що суттєво відрізняється від нуля і говорить про значну анізотропію. Зазвичай головний внесок у анізотропію пружних властивостей дає модуль зсуву G . Побудовано та проаналізовано просторові 3D розподіли пружних модулів таких як модуль Юнга E , об'ємний модуль пружності B та модуль зсуву G кристала. Показано, що об'ємний модуль стиску для кристала характеризується сферичною поверхнею, що відповідає майже ізотропному випадку. Найбільша анізотропія отримана для розподілу модуля зсуву G . Розраховано розподіли швидкостей поширення акустичних хвиль у кристалі для порцій (100) і (001) та проаналізовано їх анізотропію. Отримано теоретичну температуру Дебая досліджуваного кристала.

Ключові слова: напівпровідник, халькопїрит, пружні властивості, анізотропія.

¹ **Подяки:** Робота виконана в рамках проекту PRELUDIUM 15 Національного центру науки Польщі (грант № 2018/29/N/ST3/02901) (This work is supported by the PRELUDIUM 15 program of Polish National Science Center (Grant No. 2018/29/N/ST3/02901)).

Myron RUDYSH

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Fellow at the Department of General Physics, Ivan Franko National University, 19 Dragomanov str., Lviv, Ukraine, 79000; Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025; Department of Theoretical Physics, Jan Dlugosz University in Częstochowa, 13/15, Armii Krajowej Al., Częstochowa, PL-42-200, Poland; General Physics Department, Lviv Polytechnic National University, 12, Bandera Str., Lviv, Ukraine, 79000.

ORCID ID: 0000-0002-5431-5652

SCOPUS-AUTHOR ID: 55858314300

Galina MYRONCHUK

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Director of the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0002-9088-3825

SCOPUS-AUTHOR ID: 36245422900

Oksana RUDYSH

Teacher of Physics, Bratkovychi School I-II centuries, 33 Shkilna Str, Bratkovychi, Ukraine, 81524

ORCID ID: 0000-0002-3544-3093

To cite this article: Rudysh, M., Myronchuk, G., Rudysh, O. (2022). Anizotropiia pruzhnykh ta akustychnykh vlastyvostei krystaliv AgGaTe₂ [Anisotropy of elastic and acoustic properties of AgGaTe₂ crystals]. *Physics and Educational Technology*, 2, 70–78, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-9>

ANISOTROPY OF ELASTIC AND ACOUSTIC PROPERTIES OF AgGaTe₂ CRYSTALS

Within the framework of the density functional theory using the CASTEP program, which is based on the pseudopotential method with the basis of Bloch-type plane waves, first-principle calculations of the elastic properties of the AgGaTe₂ crystal were carried out. The full matrix of elastic stiffness coefficients C_{ij} was obtained using the generalized gradient approximation as an exchange-correlation functional. It is shown that the calculated elastic stiffness coefficients satisfy the Born criterion of material stability for tetragonal symmetry. The coefficients of elastic stiffness were used to estimate the linear compressibility k_a and k_c along the axes a and c , respectively. The calculated values of compressibility are as follows: $k_a = 8.9 \times 10^{-3} \text{ GPa}^{-1}$ and $k_c = 10.3 \times 10^{-3} \text{ GPa}^{-1}$, for a and c directions, respectively. Hence, the volumetric compressibility for the AgGaTe₂ crystal is $k = 28.1 \times 10^{-3} \text{ GPa}^{-1}$. It is shown that the studied crystal has significant anisotropy of elastic properties. The analysis of anisotropy was carried out for the purpose of its quantitative and qualitative assessment. The universal anisotropy index A^U was calculated, which characterizes the anisotropy of both the bulk modulus of the crystal and the anisotropy of the shear modulus. For the AgGaTe₂ crystal, the universal anisotropy index is equal to 1.015, which is significantly different from zero and indicates significant anisotropy. Usually, the main contribution to the anisotropy of elastic properties is given by the shear modulus G . Spatial 3D distributions of elastic moduli such as Young's modulus E , bulk modulus B , and shear modulus G of the crystal were constructed and analyzed. It is shown that the bulk modulus for the crystal is characterized by a spherical surface, which corresponds to the almost isotropic case. The largest anisotropy was obtained for the distribution of the shear modulus G . The distributions of the propagation velocities of acoustic waves in the crystal were calculated for pistons (100) and (001) and their anisotropy was analyzed. The theoretical Debye temperature of the investigated crystal was obtained.

Key words: semiconductor, chalcopyrite, elastic properties, anisotropy.

Вступ. Халькопїритні напівпровідникові кристали групи I-III-VI₂, де I = Cu, Ag, III = Al, Ga, In, VI = S, Se, Te знаходять різноманітне практичне застосування в різних галузях. Ці матеріали використовують в оптоелектроніці, нелінійній оптиці, п'єзоелектриці, електрооптиці та енергетиці. В сукупності характеристики матері-

алу дозволяють конструювати на їх основі досить ефективні пристрої, які використовуються як комерційні продукти. Відомо, що ці матеріали мають хороші перспективи бути застосованими в ефективних тонкоплівкових фотоелектричних перетворювачах. На сьогодні ефективність таких перетворювачів перевищує 24%.

Великий інтерес викликає дослідження представника цієї групи, кристала AgGaTe_2 . Структура цього кристала була досліджена у роботі (Hahn, 1953), що є однією з перших робіт по його дослідженню. Повідомляється, що p -тип AgGaTe_2 має високий потенціал для термоелектричного застосування і вже продемонстрував безрозмірну термоелектричну добротність (ZT) 0,8 (Parker, 2012). Деякі оптичні властивості цього кристала досліджено у роботах (Arai, 2010; Mitra, 2007). Дослідженню електронної структури та фізичних властивостей також присвячена робота (Rudysh, 2020).

У цій роботі нами проведено дослідження пружних та акустичних властивостей кристала AgGaTe_2 з перших принципів. Проведено їх аналіз та обговорено анізотропію. Також ця робота присвячена розрахунку акустичних властивостей та вивченню анізотропії поширення акустичних хвиль у кристалі.

Методика обрахунку. Проведені у цій роботі теоретичні розрахунки виконані за допомогою програми CASTEP (Clark, 2005). В основі цієї програми лежить код, що є практичною реалізацією теорії функціоналу густини. Теорія функціоналу густини, що базується на теоремах Кона-Хоенберга, замість багатоелектронної хвильової функції, що залежить від $3N$ змінних, використовує електронну густину $n(\mathbf{r})$, яка залежить від трьох просторових координат. Використання електронної густини разом з наближенням Борна-Опенгеймера, а також з врахуванням періодичності кристалічної структури суттєво спростили задачу та зробили можливим практичні розрахунки реальних матеріалів.

Потенціал кристалічного поля, що описує взаємодію електронів з ядрами у матеріалі, описувався за допомогою ультрам'якого функціоналу Вандербільта (Vanderbilt, 1990), який показав себе таким, що добре описує більшість кристалічних систем. Його використання суттєво зменшує кількість плоских хвиль, та як наслідок, скорочення обрахункових затрат. У якості базису, використовувались плоскі хвилі Блохівського типу. Електронна конфігурація, що використовувалась у цій роботі була такою: $\text{Ag } 4d^{10} 5s^1$; $\text{Ga } 3d^{10} 4s^2 4p^1$ and $\text{Te } 5s^2 5p^4$.

Обмінно-кореляційна взаємодія між електронами описувалась узагальненим градієнтним наближенням GGA з параметризацією Пердю–Бурке–Ернзергофа (PBE) (Perdew, 1996;

Perdew, 1992). Це наближення добре описує більшість систем. До його недоліків відносять незначне завищення довжини хімічних зв'язків та недооцінка ширини забороненої зони (Muruganatham, 2019; Chen, 2021.).

Інтегрування проводилось по k -сітці першої зони Бріллоена яка вибиралась за схемою Монкхорста-Пека (Monkhorst, 1976.) та для досліджуваного матеріалу була вибрана як $4 \times 4 \times 3$. Усі обрахунки проводились самоузгоджено. Критерієм збіжності власних значень було досягнення різниці енергії на двох послідовних ітераціях не гіршої за 2×10^{-7} еВ/атом.

Геометрична оптимізація структури кристала проводилась методом Бройдена-Флетчера-Голдфарба-Шенно (BFGS) (Pfrommer, 1997). Параметри збіжності використані впродовж оптимізації були такими: максимальна сила 3×10^{-2} еВ/Å; максимальний тиск 5×10^{-3} ГПа; максимальне зміщення іонів 1×10^{-4} Å.

Результати обрахунків та їх обговорення. Пружні властивості матеріалів мають фундаментальний характер та визначають його механічні властивості. Їх дослідження є важливим через потребу розуміння поведінки матеріалу при різних типах деформацій, що є необхідним при конструюванні точних приладів та елементів установок в яких зміна геометричних розмірів чи іншої деформації суттєво впливає на їх характеристики. Пружні властивості матеріалів описуються законом Гука. Для кристалічних матеріалів присутня анізотропія фізичних властивостей, тому пружні властивості визначаються тензорною формою цього закону. Коефіцієнти пружної жорсткості C_{ijkl} описуються тензором четвертого рангу і можуть бути зведеними до матриці C_{ij} за допомогою згортки Фойгта $11 \rightarrow 1, 22 \rightarrow 2, 33 \rightarrow 3, 23 \rightarrow 4, 13 \rightarrow 5, 12 \rightarrow 6$. Константи пружності можна отримати шляхом вибору деформації прикладеної до кристала і, отже, обчислення результуючих тисків. Тензор пружних сталей можна визначити за допомогою розкладу в ряд Тейлора повної енергії $E(V, \delta)$ досліджуваної системи відносно малої деформації δ об'єму елементарної комірки V (Majchrowski, 2018):

$$E(V, \delta) = E(V_0, 0) + V_0 \left(\sum_i \xi_i \tau_i + \frac{1}{2} \sum_{ij} C_{ij} \xi_i \xi_j \right) + O(\delta^3), \quad (1)$$

де $E(V_0, 0)$ – енергія недеформованої системи, V_0 – рівноважний об'єм, τ_0 – елемент тензора напружень, ξ_i – коефіцієнт Фойгта. Врахо-

вуючи відсутність початкового напруження ($\tau_i = 0$), зміна енергії є отриманою з других похідних повної енергії щодо різних комбінацій деформацій. Зв'язок між енергією деформації (E_s) і тензорами пружної жорсткості є таким:

$$E_s(V, \epsilon) = \frac{1}{2} V_0 \sum_{ij} C_{ij} \epsilon_i^{3/4} \epsilon_j^{3/4}, \quad (2)$$

а константи пружної жорсткості C_{ij} можна отримати шляхом підгонки рівняння (2). Цей метод визначення сталих пружності називають методом деформації-напруження.

При дослідженні кристалів AgGaTe_2 розрахунки проводились з використанням GGA функціоналу. Отримані у цій роботі компоненти тензора C_{ij} з використанням GGA функціоналу зібрані в таблиці 1. Відомо, що для практичного застосування матеріалу досить важливим є стабільність його кристалічної структури. Знання пружних констант важливо для технологічних цілей у процесі виробництва та підготовки кристалів. Перевірку механічної стійкості кристала AgGaTe_2 проводили за відомими критеріями Борна (рівняння 3). Для стійкості кристалічної структури тетрагональної симетрії отримані константи пружної жорсткості повинні відповідати вимогам критеріїв механічної стійкості (Waller, 1956):

$$\begin{aligned} C_{ii} > 0 \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5 \text{ and } 6), \\ (C_{11} - C_{12}) > 0; (C_{11} + C_{33} - 2C_{13}) > 0, \\ 2[(C_{11} + C_{12}) + C_{33} + 4C_{13}] > 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Як видно з таблиці 1, розраховані константи пружної жорсткості C_{ij} для кристалів AgGaTe_2 повністю задовольняють усім критеріям (3), що свідчить про механічну стійкість їх структури. Порівнюючи пружні коефіцієнти C_{11} , C_{12} , C_{13} , C_{33} , C_{44} , C_{66} , видно, що вони є додатними для всіх кристалів. Сталі пружної жорсткості в розглянутому матеріалі досить малі (суттєво менші за 100 ГПа). У загальному вигляді з таблиці 1 видно, що коефіцієнти C_{ij} відрізняються один від одного, що говорить про

анізотропію механічних властивостей цього кристала. У таблиці 1 також приведено результати розрахунків пружних констант з використанням WC-GGA методу (Sharma, 2014). Порівнюючи результати отримані Sharma та ін. (Sharma, 2014), видно, що WC-GGA метод дає значення коефіцієнтів пружної жорсткості дещо більші ніж отримано при використанні GGA методу.

Як видно з табл. 1, константи C_{11} і C_{33} є найбільшими для AgGaTe_2 , що вказує на найбільший опір кристала осьовому стиску вздовж напрямків x і z та задовольняє співвідношення $C_{11} > C_{33}$. Найбільший коефіцієнт C_{11} означає, що в напрямках x і y при однакових тисках кристал менше стискається, ніж у напрямку z . Значення C_{11} і C_{33} відрізняються один від одного, що свідчить про анизотропію пружних властивостей. Таблиця показує, що коефіцієнти зсуву C_{12} і C_{13} близькі один до одного, демонструючи однакову взаємодію у відповідних напрямках зсуву. Використовуючи значення C_{ij} , можна оцінити лінійну стисливість уздовж головних осей ґратки. Для тетрагональної структури наступні співвідношення дають можливість розрахувати лінійну стисливість k_a і k_c вздовж осі a і c , відповідно, через модулі пружної жорсткості

$$k_a = -\frac{1}{a} \frac{\partial a}{\partial p} = \frac{C_{33} - C_{13}}{C_{33}(C_{11} + C_{12}) - 2C_{13}^2} \quad (4)$$

$$k_c = -\frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial p} = \frac{C_{11} + C_{12} - 2C_{13}}{C_{33}(C_{11} + C_{12}) - 2C_{13}^2}. \quad (5)$$

Розраховані значення стисливості є такими: $k_a = 8,9 \cdot 10^{-3}$ ГПа⁻¹ та $k_c = 10,3 \cdot 10^{-3}$ ГПа⁻¹, для a та c напрямків, відповідно. Крім того, об'ємну стисливість k можна розрахувати як

$$k = \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} = 2k_a + k_c. \quad (6)$$

Звідси отримано, що об'ємна стисливість для кристала AgGaTe_2 становить $k = 28,1 \cdot 10^{-3}$ ГПа⁻¹.

Таблиця 1

Константи пружної жорсткості C_{ij} (в ГПа) та пружної податливості S_{ij} (в ГПа⁻¹) кристалів групи I-III-VI₂, розраховані за допомогою GGA функціоналу

ij	11	33	44	66	12	13
C_{ij} (GGA)	49,3	48,3	23,6	26,4	30,1	28,0
C_{ij} (WC-GGA) ^a	69,0	63,2	19,7	23,7	44,6	45,5
S_{ij}	0,03663	0,03502	0,04246	0,03787	-0,01533	-0,01234

^aЛім. (Sharma, 2014)

Оцінка анізотропії матеріалу також є важливим завданням при вивченні властивостей кристалічних матеріалів. Для оцінки ступеня анізотропії пружних властивостей матеріалу використовують універсальний індекс анізотропії A^U . Він є зручним для оцінки, а також містить у собі внесок як об'ємного модуля пружності так і модуля зсуву. Розраховують A^U за формулою:

$$A^U = 5 \frac{G_V}{G_R} + \frac{B_V}{B_R} - 6. \quad (7)$$

де B_V , B_R та G_V , G_R – об'ємний модуль та модуль зсуву отримані за схемами Фойгта та Реуса. Розраховане значення індексу анізотропії становить 1,015, що суттєво відрізняється від нуля. Зазвичай головний внесок у анізотропію пружних властивостей дає анізотропія зсуву.

Додатково нами побудовано 3D просторові розподіли модуля Юнга E , об'ємного модуля пружності B та модуля зсуву G . Такі побудови

дозволяють наочно зобразити анізотропію цих величин у просторі. Для кристала AgGaTe_2 просторовий розподіл може бути отриманий виходячи з таких виразів:

$$\frac{1}{E} = S_{11}(l_1^4 + l_2^4) + (2S_{13} + S_{44})(l_1^2 l_2^2 + l_2^2 l_3^2) + S_{33}l_3^4 + (2S_{12} + S_{66})l_1^2 l_2^2, \quad (8)$$

$$\frac{1}{B} = (S_{11} + S_{12} + S_{13})(l_1^2 + l_2^2) + (2S_{13} + S_{33})l_3^2, \quad (9)$$

$$\frac{1}{G} = 2S_{11}(1-l_1^2)l_1^2 + 2S_{11}(1-l_2^2)l_2^2 + 2S_{33}(1-l_3^2)l_3^2 - 4S_{12}l_1^2 l_2^2 - 4S_{13}l_1^2 l_3^2 - 4S_{13}l_2^2 l_3^2 + 1/2S_{44}(l_2^2 + l_3^2 - 4l_1^2 l_3^2) + 1/2S_{44}(l_1^2 + l_3^2 - 4l_2^2 l_3^2) + 1/2S_{66}(l_1^2 + l_2^2 - 4l_1^2 l_2^2), \quad (10)$$

де S_{ij} – коефіцієнт пружної податливості, l_1 , l_2 та l_3 – напрямні косинуси. Сферична форма поверхні відповідає ізотропному випадку. Будь-яке відхилення від сферичної форми характеризує ступінь анізотропії.

На рисунку 1 зображено побудовану тривимірну поверхню розподілу модуля Юнга, об'ємного модуля пружності, та модуля зсуву.

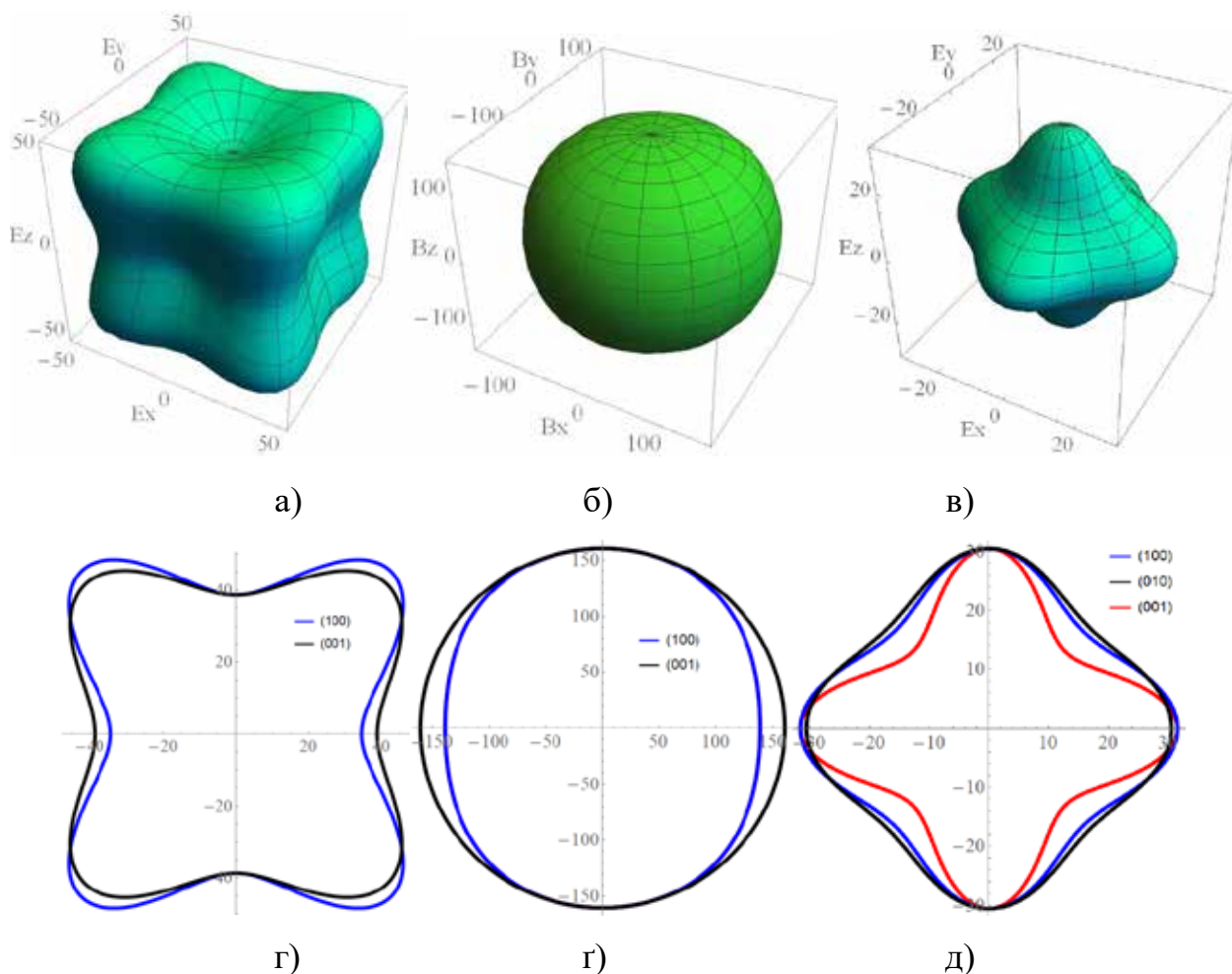


Рис. 1. Розраховані 3D просторові розподіли модуля Юнга E (а), об'ємного модуля пружності B (б) та модуля зсуву G (в) кристала AgGaTe_2 . На рисунках г), г), д) зображено проєкції на площини розподілів модуля Юнга, об'ємного модуля пружності та модуля зсуву, відповідно

Як видно з рисунка, найбільшою анізотропією володіє розподіл модуля зсуву G та модуля Юнга E . Найменша анізотропія притаманна розподілу об'ємного модуля пружності B , форма якого майже сферична. Детальніший аналіз можна провести з проєкцій розподілів пружних модулів на площини. Як видно з рисунка 1 (г, г, д), проєкція модуля Юнга має форму подібну до метелика. Спостерігається стиснення проєкції E для площини (100) у напрямку z порівняно з проєкцією в площині (001). Подібно до проєкції модуля Юнга для об'ємного модуля пружності також спостерігається деформація проєкції у площині (100), тоді як проєкція розподілу B на площину (001) є ізотропною. Проєкції розподілу модулів зсуву мають форму подібну на квітку. Вони характеризуються найбільшою анізотропією. Подібні результати були отримані для кристалів AgAlS_2 (Rudysh, 2022) та Ag_2SiS_3 (Rudysh, 2020).

Пружні властивості пов'язані іншими фізичними параметрами матеріалів. Так, коефіцієнти пружної жорсткості C_{ij} можна використати для оцінки швидкості поширення акустичних хвиль в кристалі. У випадку анізотропного середовища пружні властивості змінюються залежно від напрямку, що розглядається. Таким чином, зв'язок пружних сталих зі швидкостями акустичних хвиль помітно ускладнюється. Для співставлення параметрів плоскої монохроматичної хвилі, що біжить у напрямку, заданому єдиним вектором хвильової нормалі $n(n_1, n_2, n_3)$, із густиною кристала та його тензором пружності використовується такий вираз:

$$\rho v^2 u_i = C_{ijkl} n_j n_l u_k, \quad (11)$$

де ρ – густина середовища, v – фазова швидкість хвилі, C_{ijkl} – тензор пружності, u_i – переміщення точок середовища. Згортка тензора пружності на компонентах хвильової нормалі називається тензором Гріна-Крістоффеля і позначається як

$$\Gamma_{ik} = C_{ijkl} n_j n_l. \quad (12)$$

У рівнянні (11) ρv^2 є власним значенням тензора Гріна-Крістоффеля, а u є його власним вектором. Система (11) матиме розв'язок, якщо її визначник дорівнює нулю:

$$\det[\Gamma_{ij} - \rho v^2 \delta_{ij}] u_j = 0, \quad (13)$$

де δ_{ij} – дельта функція (коли $i = j$, $\delta_{ij} = 1$ та коли $i \neq j$, $\delta_{ij} = 0$).

Секулярне рівняння (13) має три розв'язки. Вони дозволяють знайти значення швидкості звуку, що відповідають повздовжній (LA) та двом поперечним (TA_1 , TA_2) акустичним хвилям. Ми розрахували швидкість акустичних хвиль у різних напрямках поширення. Рис. 2 демонструє швидкість поширення звуку в кристалі AgGaTe_2 у площинах (100) та (001).

Із рисунка видно, що швидкість поширення звуку в кристалі AgGaTe_2 має незначну анізотропію (в цілому). Хвиля TA_1 поширюється в кристалі з майже однаковою швидкістю в усіх напрямках. Максимальні та мінімальні значення швидкості звуку в площині атомного шару (001) і в перпендикулярній площині (100) зібрані в таблиці 2.

Для оцінки анізотропії швидкості акустичних хвиль в монокристалах часто використовують так званий процентний показник анізотропії A :

$$A = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{\frac{1}{2}(V_{\max} + V_{\min})} \times 100\%, \quad (14)$$

Для LA хвиль анізотропія швидкості поширення звуку становить $A = 12,3\%$ ($14,9\%$), для $\text{TA}_1 - A = 2,6\%$ ($5,3\%$), а для TA_2 показник анізотропії $A = 40,5\%$ ($43,6\%$) для площини (100) ((001)), відповідно. Результати розрахунків показника анізотропії акустичних хвиль для кристала AgGaTe_2 показують, що анізотропія хвилі TA_2 є найбільшою, а анізотропія хвилі TA_1 – найменшою.

З розрахованих швидкостей поширення поздовжніх і поперечних акустичних хвиль, які отримані з розрахованих пружних констант і модуля пружності, можна розрахувати температуру Дебая Θ_D для кристалів халькопїриту. Її можна отримати з рівняння Нав'є

$$\Theta_D = \frac{h}{k_B} \left[\frac{3n}{4A} \frac{N_A \rho}{M} \right]^{\frac{1}{3}} v_m, \quad (15)$$

де h – стала Планка, k_B – стала Больцмана, N_A – число Авогадро, n – кількість атомів в елементарній комірці, ρ – густина матеріалу, M – маса елементарної комірочки, а v_m – усереднене значення швидкості пружної хвилі. Усереднена швидкість пружної хвилі визначається як:

$$v_m = \left[\frac{1}{3} \left(\frac{2}{v_t^3} + \frac{1}{v_l^3} \right)^{\frac{1}{3}} \right]. \quad (16)$$

Використані для розрахунку усередненої швидкості v_m поперечна v_t і поздовжня v_l швидкості полікристалічного матеріалу розраховуються таким чином:

$$v_l = \left[\frac{(3B + 4G)}{3\rho} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (17)$$

$$v_t = \left(\frac{G}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (18)$$

де B і G – об’ємний модуль і модуль зсуву відповідно, ρ – густина матеріалу, v_l – поздовжня швидкість звуку, v_t – поперечна швидкість звуку. Розрахована температура Дебая рівна

$\Theta_D = 180,48$ К, тоді як у літературі наявні дані інших досліджень, що $\Theta_D = 182,4$ К (Weber, 2003), 172 К (Weber, 2003), 129 К (Kumar, 2009), 122 К (Kumar, 2009), що є в доброму узгодженні.

Висновки. У роботі проведено теоретичне моделювання пружних властивостей у кристалі AgGaTe_2 з використанням першопринципних обрахунків проведених в рамках теорії функціоналу густини. Отримано матрицю коефіцієнтів пружної податливості C_{ij} . З’ясовано, що кристал AgGaTe_2 є механічно стабільним, оскільки задовольняє критерій Борна для тетрагональних кристалів. Показано, що пружні властивості кристала є анізотропними. Розрахований універсальний індекс анізотропії $A^U = 1,015$, що свідчить про значну анізотропію. Детальніше вивчення анізотропії проводилось шляхом побудови просторового розподілу модуля

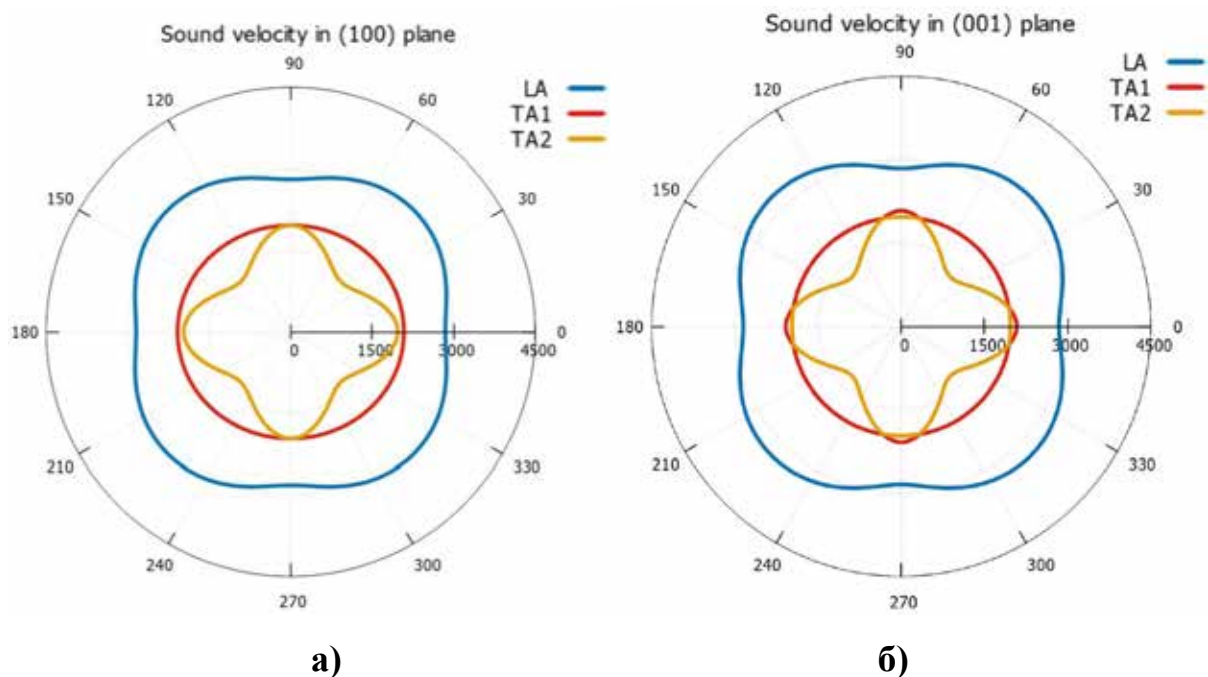


Рис. 2. Розраховані розподіли швидкостей поширення акустичних хвиль у площинах (100) (а) та (001) (б) кристала AgGaTe_2

Таблиця 2

Максимальні V_{\max} та мінімальні V_{\min} швидкості звуку в кристалі AgGaTe_2 методом GGA з використанням рівнянь Крістоффеля

	(100) plane		(001) plane	
	$V_{\max}, \text{ m s}^{-1}$	$V_{\min}, \text{ m s}^{-1}$	$V_{\max}, \text{ m s}^{-1}$	$V_{\min}, \text{ m s}^{-1}$
LA	3192,65	2822,13	3286,81	2829,62
TA ₁	2030,29	1978,83	1968,63	2074,52
TA ₂	1978,83	1312,16	1962,73	1259,52

Юнга, об'ємного модуля пружності та модуля зсуву. Показано, що найбільшою анізотропією володіють модуль Юнга та модуль зсуву. Водночас об'ємний модуль пружності має найменшу анізотропію, а в площині (001) розподіл B є ізотропним.

Використовуючи коефіцієнти пружної жорсткості C_{ij} , отримані з використанням GGA функціоналу, проведено розрахунок швидко-

стей поширення акустичних хвиль у досліджуваному кристалі. Отримано значення повздовжньої LA та двох поперечних (TA_1 і TA_2) акустичних хвиль у площинах (100) та (001).

Зі швидкостей поширення акустичних хвиль отримано температуру Дебая кристала $AgGaTe_2$. Показано узгодження отриманих результатів з наявними літературними даними.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Hahn H., Frank G., Klingler W., Meyer A.-D., Störger G., Untersuchungen über ternäre Chalkogenide. V. Über einige ternäre Chalkogenide mit Chalkopyritstruktur, *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*. 1953. 271. P. 153–170.
2. Parker D., Singh D.J., Thermoelectric properties of $AgGaTe_2$ and related chalcopyrite structure materials, *Phys. Rev. B*. 2012. 85. P. 125209.
3. Arai S., Ozaki S., Adachi S., Optical properties and electronic band structure of $AgGaTe_2$ chalcopyrite semiconductor, *Appl. Opt., AO*. 2010. 49. P. 829–837.
4. Mitra C., Lambrecht W.R.L., Band-gap bowing in $AgGa(Se_{1-x}Te_x)_2$ and its effect on the second-order response coefficient and refractive indices, *Phys. Rev. B*. 2007. 76. P. 205206.
5. Rudysh M.Ya., Piasecki M., Myronchuk G.L., Shchepanskyi P.A., Stadnyk V.Yo., Onufriv O.R., Brik M.G., $AgGaTe_2$ – The thermoelectric and solar cell material: Structure, electronic, optical, elastic and vibrational features, *Infrared Physics & Technology*. 2020. 111. P. 103476.
6. Clark S.J., Segall M.D., Pickard C.J., Hasnip P.J., Probert M.I.J., Refson K., Payne M.C., First principles methods using CASTEP, *Zeitschrift Für Kristallographie – Crystalline Materials*. 2005. 220. P. 567–570.
7. Vanderbilt D., Soft self-consistent pseudopotentials in a generalized eigenvalue formalism, *Phys. Rev. B*. 1990. 41. P. 7892–7895.
8. Perdew J.P., Burke K., Ernzerhof M., Generalized Gradient Approximation Made Simple, *Phys. Rev. Lett.* 1996. 77. P. 3865–3868.
9. Perdew J.P., Chevary J.A., Vosko S.H., Jackson K.A., Pederson M.R., Singh D.J., Fiolhais C., Atoms, molecules, solids, and surfaces: Applications of the generalized gradient approximation for exchange and correlation, *Phys. Rev. B*. 1992. 46. P. 6671–6687.
10. Muruganatham R., Liu W.-R., Lin C.-H., Rudysh M., Piasecki M., Design of meso/macro porous 2D Mn-vanadate as potential novel anode materials for sodium-ion storage, *Journal of Energy Storage*. 2019. 26. P. 100915.
11. Chen J.-A., Piasecki M., Yang C.-C., Rudysh M., Liu W.-R., Synthesis, luminescent properties and ab initio study of yellow-emitting $Sr_8MgGa(PO_4)_7:Eu^{2+}$ phosphors for white light-emitting diodes, *Journal of Luminescence*. 2021. 235 P. 117982.
12. Monkhorst H.J., Pack J.D., Special points for Brillouin-zone integrations, *Phys. Rev. B*. 1976. 13. P. 5188–5192.
13. Pfrommer B.G., Côté M., Louie S.G., Cohen M.L., Relaxation of Crystals with the Quasi-Newton Method, *Journal of Computational Physics*. 1997. 131. P. 233–240.
14. Majchrowski A., Chrunik M., Rudysh M., Piasecki M., Ozga K., Lakshminarayana G., Kityk I.V., Bi_3TeBO_9 : electronic structure, optical properties and photoinduced phenomena, *J. Mater. Sci.* 2018. 53. P. 1217–1226.
15. Waller I., Dynamical Theory of Crystal Lattices by M. Born and K. Huang, *Acta Cryst.* 1956. 9. P. 837–838.
16. Sharma S., Verma A.S., Jindal V.K., Ab initio studies of structural, electronic, optical, elastic and thermal properties of silver gallium dichalcogenides ($AgGaX_2$; X = S, Se, Te), *Materials Research Bulletin. C*. 2014. P. 218–233.
17. Rudysh M.Ya., Electronic structure, optical and elastic properties of $AgAlS_2$ crystal under hydrostatic pressure, *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2022. 148. P. 106814.
18. Rudysh M.Ya., Shchepanskyi P.A., Fedorchuk A.O., Brik M.G., Ma C.-G., Myronchuk G.L., Piasecki M., First-principles analysis of physical properties anisotropy for the Ag_2SiS_3 chalcogenide semiconductor, *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. 826. P. 154232.
19. Weber M.J., Handbook of optical materials, *CRC Press*, 2003.
20. Kumar V., Shrivastava A.K., Banerji R., Dhirhe D., Debye temperature and melting point of ternary chalcopyrite semiconductors, *Solid State Communications*. 2009. 25–26. P. 1008–1011.

REFERENCES:

1. Hahn H., Frank G., Klingler W., Meyer A.-D., Störger G., Untersuchungen über ternäre Chalkogenide. V. Über einige ternäre Chalkogenide mit Chalkopyritstruktur, *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*. 1953. 271. P. 153–170 [in English].
2. Parker D., Singh D.J., Thermoelectric properties of AgGaTe₂ and related chalcopyrite structure materials, *Phys. Rev. B*. 2012. 85. P. 125209 [in English].
3. Arai S., Ozaki S., Adachi S., Optical properties and electronic band structure of AgGaTe₂ chalcopyrite semiconductor, *Appl. Opt., AO*. 2010. 49. P. 829–837 [in English].
4. Mitra C., Lambrecht W.R.L., Band-gap bowing in AgGa(Se_{1-x}Te_x)₂ and its effect on the second-order response coefficient and refractive indices, *Phys. Rev. B*. 2007. 76. P. 205206 [in English].
5. Rudysh M.Ya., Piasecki M., Myronchuk G.L., Shchepanskyi P.A., Stadnyk V.Yo., Onufriv O.R., Brik M.G., AgGaTe₂ – The thermoelectric and solar cell material: Structure, electronic, optical, elastic and vibrational features, *Infrared Physics & Technology*. 2020. 111. P. 103476 [in English].
6. Clark S.J., Segall M.D., Pickard C.J., Hasnip P.J., Probert M.I.J., Refson K., Payne M.C., First principles methods using CASTEP, *Zeitschrift Für Kristallographie – Crystalline Materials*. 2005. 220. P. 567–570 [in English].
7. Vanderbilt D., Soft self-consistent pseudopotentials in a generalized eigenvalue formalism, *Phys. Rev. B*. 1990. 41. P. 7892–7895 [in English].
8. Perdew J.P., Burke K., Ernzerhof M., Generalized Gradient Approximation Made Simple, *Phys. Rev. Lett*. 1996. 77. P. 3865–3868 [in English].
9. Perdew J.P., Chevary J.A., Vosko S.H., Jackson K.A., Pederson M.R., Singh D.J., Fiolhais C., Atoms, molecules, solids, and surfaces: Applications of the generalized gradient approximation for exchange and correlation, *Phys. Rev. B*. 1992. 46. P. 6671–6687 [in English].
10. Muruganantham R., Liu W.-R., Lin C.-H., Rudysh M., Piasecki M., Design of meso/macro porous 2D Mn-vanadate as potential novel anode materials for sodium-ion storage, *Journal of Energy Storage*. 2019. 26. P. 100915 [in English].
11. Chen J.-A., Piasecki M., Yang C.-C., Rudysh M., Liu W.-R., Synthesis, luminescent properties and ab initio study of yellow-emitting Sr₈MgGa(PO₄)₇:Eu²⁺ phosphors for white light-emitting diodes, *Journal of Luminescence*. 2021. 235 P. 117982 [in English].
12. Monkhorst H.J., Pack J.D., Special points for Brillouin-zone integrations, *Phys. Rev. B*. 1976. 13. P. 5188–5192 [in English].
13. Pfrommer B.G., Côté M., Louie S.G., Cohen M.L., Relaxation of Crystals with the Quasi-Newton Method, *Journal of Computational Physics*. 1997. 131. P. 233–240 [in English].
14. Majchrowski A., Chrunik M., Rudysh M., Piasecki M., Ozga K., Lakshminarayana G., Kityk I.V., Bi₃TeBO₉: electronic structure, optical properties and photoinduced phenomena, *J. Mater Sci*. 2018. 53. P. 1217–1226 [in English].
15. Waller I., Dynamical Theory of Crystal Lattices by M. Born and K. Huang, *Acta Cryst*. 1956. 9. P. 837–838 [in English].
16. Sharma S., Verma A.S., Jindal V.K., Ab initio studies of structural, electronic, optical, elastic and thermal properties of silver gallium dichalcogenides (AgGaX₂: X = S, Se, Te), *Materials Research Bulletin. C*. 2014. P. 218–233 [in English].
17. Rudysh M.Ya., Electronic structure, optical and elastic properties of AgAlS₂ crystal under hydrostatic pressure, *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2022. 148. P. 106814 [in English].
18. Rudysh M.Ya., Shchepanskyi P.A., Fedorchuk A.O., Brik M.G., Ma C.-G., Myronchuk G.L., Piasecki M., First-principles analysis of physical properties anisotropy for the Ag₂SiS₃ chalcogenide semiconductor, *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. 826. P. 154232 [in English].
19. Weber M.J., Handbook of optical materials, *CRC Press*, 2003 [in English].
20. Kumar V., Shrivastava A.K., Banerji R., Dhirhe D., Debye temperature and melting point of ternary chalcopyrite semiconductors, *Solid State Communications*. 2009. 25–26. P. 1008–1011 [in English].

УДК 378.016:53

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-10>

Анатолій СІЛЬВЕЙСТР

доктор педагогічних наук, професор кафедри фізики і методики навчання фізики, астрономії, Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, вул. Острозького, 32, м. Вінниця, Україна, 21001

ORCID ID: 0000-0002-3633-3910

Микола МОКЛЮК

кандидат педагогічних наук, доцент кафедри фізики і методики навчання фізики, астрономії, Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, вул. Острозького, 32, м. Вінниця, Україна, 21001

ORCID ID: 0000-0002-8717-5940

Бібліографічний опис статті: Сільвейстр, А., Моклюк, М. (2022). Реалізація навчального матеріалу з фізики у дисциплінах хімічного і біологічного спрямування. *Фізика та освітні технології*, 1, 79–86, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-10>

РЕАЛІЗАЦІЯ НАВЧАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ З ФІЗИКИ У ДИСЦИПЛІНАХ ХІМІЧНОГО І БІОЛОГІЧНОГО СПРЯМУВАННЯ

У статті розглядається реалізація навчального матеріалу з фізики під час опанування дисциплін хімічного і біологічного спрямування. Встановлено, що загальна фізика студентами нефізичних спеціальностей вивчається на перших курсах педагогічних закладів вищої освіти. У цей період вони слабо уявляють, які знання з фізики їм можуть стати в нагоді у майбутній професійній діяльності. У зв'язку з цим виникає необхідність організації занять таким чином, щоб студенти хімічних і біологічних спеціальностей вже на перших роках навчання могли зрозуміти, де та як застосовуються фізичні знання у їхній майбутній професії.

У статті акцентується увага на застосуванні міждисциплінарних зв'язків під час вивчення фізики у студентів хімічного і біологічного профілю. У такому випадку використовується інтегрований підхід, який передбачає поєднання фізичного матеріалу з матеріалом хімічного і біологічного спрямування. Виходячи із цього, розробляються лекційні, практичні та лабораторні заняття, під час яких фізичні знання використовуються для вирішення хімічних та біологічних проблем і завдань.

Проведено синтез навчального матеріалу з фізики, хімії і біології як вищого рівня інтеграції природничо-наукових знань, проаналізовано інтегровані заняття та запропоновано їх реалізацію на основі використання засобів мультимедіа з раціональним поєднанням традиційних методів. Наведені в роботі приклади тем інтеграційного змісту з фізики, хімії і біології допомагають формувати природничо-наукові знання студентів нефізичних спеціальностей педагогічних закладів вищої освіти.

З'ясовано, що підібраний навчальний матеріал такого змісту сприяє студентам краще засвоїти фізичні явища та закони в дисциплінах хімічного та біологічного спрямування й отримати знання, які стануть у нагоді в їхній професійній діяльності.

Ключові слова: фізика, навчальний матеріал, дисципліни хімічного та біологічного спрямування, інтегрований підхід, міждисциплінарний зв'язок.

Anatolii SILVEISTR

Doctor of Pedagogical Sciences, Professor at the Department of Physics and Teaching Methods of Physics, Astronomy, Vinnytsia Mykhailo Kotsiubynskyi State Pedagogical University, Ostrozkoho str., 32, Vinnytsia, Ukraine, 21001

ORCID: 0000-0002-3633-3910

Mykola MOKLIUK

PhD (in Pedagogical Sciences), Associate Professor at the Department of Physics and Teaching Methods of Physics, Astronomy, Vinnytsia Mykhailo Kotsiubynskyi State Pedagogical University, Ostrozkoho str., 32, Vinnytsia, Ukraine, 21001

ORCID: 0000-0002-8717-5940

To cite this article: Silveistr, A., Mokliuk, M. (2022). Realizatsiia navchalnoho materialu z fizyky u dystsyplinakh khimichnoho i biolohichnoho spriamuvannia [Implementation of teaching material in physics in the disciplines of chemical and biological direction]. *Physics and Educational Technology*, 1, 79–86, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-10>

IMPLEMENTATION OF EDUCATIONAL MATERIAL IN PHYSICS IN THE DISCIPLINES OF CHEMICAL AND BIOLOGICAL DIRECTION

The article considers the implementation of educational material in physics during the mastering of chemical and biological disciplines. It is established that general physics is studied by students of non-physical specialties in the first years of pedagogical institutions of higher education. During this period, they have little idea what knowledge of physics can be useful to them in future professional activities. Therefore, it is necessary to organize classes so that students of chemical and biological specialties in the first years of study can understand where and how physical knowledge is used in their future profession.

The article focuses on the use of interdisciplinary connections in the study of physics in students of chemical and biological profile. In this case, an integrated approach is used, which involves the combination of physical material with chemical and biological material. Based on this, lectures, practical and laboratory classes are developed, during which physical knowledge is used to solve chemical and biological problems and problems.

The synthesis of educational material on physics, chemistry and biology as the highest level of integration of natural sciences, the analysis of integrated classes and their implementation based on the use of multimedia with a rational combination of traditional methods. The examples of integration content in physics, chemistry and biology presented in the paper help to form natural science knowledge of students of non-physical specialties of pedagogical institutions of higher education.

It was found that the selected educational material of this content helps students to better master the physical phenomena and laws in the disciplines of chemical and biological orientation and gain knowledge that will be useful in their professional activities.

Key words: *physics, educational material, disciplines of chemical and biological orientation, integrated approach, interdisciplinary connection.*

Актуальність проблеми. Фізика поряд із біологією та хімією вивчає навколишній світ. Їхнім предметом дослідження є матерія і рух у непорушній єдності. Окремі форми руху матерії вивчаються даними науками. Оскільки кожна форма руху матерії має свої особливості, тому фізика, біологія і хімія тісно пов'язані між собою явищами та процесами, що супроводжуються у природі. Оскільки фізичні явища у природі часто переплітаються з явищами інших наук, тому не завжди можна встановити чітку межу між фізичними, хімічними і біологічними явищами.

Наряду зі швидкими темпами у реформуванні сучасної освіти зростає роль обізнаності викладача в областях суміжних наук та умінь комплексно використовувати їх при вирішенні різнорівневих завдань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченню аспекту міждисциплінарних зв'язків присвячені праці ряду відомих вчених-педагогів, таких як П. Атутова, С. Батишева, С. Гончаренка, І. Зверева, В. Максимової, М. Пак, Л. Тарасова, А. Усової, В. Федорової та ін. Реалізація міждисциплінарного підходу як умови єдності освітнього процесу розглядається

в наукових працях В. Андрущенко, В. Василькової, М. Данилова, В. Ільченко, С. Кримського, С. Курдюмова, В. Левашової, Н. Майорової, О. Маркова, Н. Стучинської, Г. Юркова та ін. Науковці відстоюють думку про те, що міждисциплінарність базується на інтеграції наукових ідей із різних галузей.

Проведений теоретичний аналіз психолого-педагогічної і методичної літератури з проблеми дослідження свідчить про важливість даного аспекту в навчанні природничих дисциплін, зокрема фізики, хімії і біології. Незважаючи на значні результати досліджень, важливі питання теоретичних та методичних основ інтеграції природничо-наукових знань студентів закладів вищої освіти (ЗВО) залишаються невирішеними. Усе це зумовило вибір теми нашого дослідження – «Реалізація навчального матеріалу з фізики у дисциплінах хімічного і біологічного спрямування».

Мета дослідження – проаналізувати фізичний матеріал у дисциплінах хімічного та біологічного циклу; навести приклади застосування фізичних процесів під час вивчення фахових дисциплін студентами хімічних та біологічних спеціальностей педагогічних університетів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Під час відбору навчального матеріалу з фізики для студентів хімічного і біологічного спрямування необхідно враховувати не лише вимоги до формування єдиної системи природничо-наукових знань, але й вимоги однакового підходу до пояснення всіх законів, явищ, процесів природи з точки зору фахового характеру, застосовності фізичних методів у хімічних і біологічних дослідженнях, забезпеченні світоглядної функції природничих дисциплін для формування єдиної природничо-наукової картини світу.

Під час проведення занять у студентів відбувається формування, узагальнення та систематизація знань з дисципліни. Кожне заняття з фізики повинно будуватися за продуманою, логічною і послідовною системою. Матеріал повинен бути структурований і систематизований, подаватися від простого до складного.

Для студентів хімічного і біологічного спрямування курс фізики має відповідати таким вимогам (Сільвейстр, 2017, с. 234):

1) бути професійно спрямованим, тобто всі теоретичні положення, які висвітлюються, мають підкріплюватися прикладами завдань, що знаходяться у взаємозв'язку фізики, хімії і біології, або виробничими питаннями за спеціальністю (отримані студентами знання з фізики будуть використовуватися для пояснення хімічних і біологічних явищ);

2) мати міждисциплінарний характер, який сприятиме встановленню зв'язків курсу фізики з матеріалом, який вивчався в інших дисциплінах (попередні), зв'язків між поняттями, законами, теоріями, що одночасно вивчаються в різних навчальних дисциплінах (супутні), зв'язків, у яких матеріал курсу фізики є базою для вивчення інших дисциплін (перспективні) (Сиротюк, 2018, с. 142–143; Каменецкий, 2000, с. 108):

3) відповідати сучасному рівню вивчення навчальної дисципліни;

4) забезпечувати світоглядну спрямованість курсів фізики, хімії і біології на формування єдиної наукової картини світу;

5) використовувати методи активного навчання (евристичне, проблемне, контекстне навчання тощо);

6) передбачати ретельний відбір теоретичних тем для самостійної роботи з урахуванням

часу, важкості і готовності до їх опанування студентами;

7) практикувати поряд із вивченням фізичних явищ та закономірностей демонстрування цих законів на прикладах з народного господарства, природи, техніки тощо;

8) демонструвати можливості застосування фізичних методів для дослідження хімічних і біологічних процесів;

9) упроваджувати засоби мультимедіа з раціональним поєднанням традиційних методів, що забезпечить набуття, поруч з якісними знаннями, вміннями і навичками з фізики, професійно важливих якостей студентів даних спеціальностей;

10) передбачати можливість співпраці викладача і студентів, що призводить до підвищення інтересу студентів до вивчення дисципліни (Сільвейстр, 2017, с. 235).

Аналізуючи особливості міждисциплінарної інтеграції, можна виділити основні види синтезу в науці і практиці: міжнауковий (біофізика, біохімія, фізична хімія тощо), методологічний (синтез змістових наукових, філософських, логічних і методологічних основ науки) і синтез під впливом соціалізації науки (мораль і пізнання, наука і моральність, соціальне і біологічне в пізнанні людини, мотивація і продуктивність наукової творчості тощо).

У сучасних умовах вищої природничо-наукової освіти навчання на основі інтеграційних процесів ускладнюється рядом суб'єктивних і об'єктивних причин. Серед них виділяємо такі, як:

1) навчальні програми з фізики не погоджені зі змістом програм суміжних дисциплін (хімії і біології);

2) дисципліни природничого циклу не являють собою єдиної системи, продовжуючи залишатися роз'єднаними за роками вивчення;

3) недостатня співпраця викладачів природничих дисциплін та їх слабка орієнтація в теорії і практиці реалізації інтеграційних підходів;

4) недостатній рівень підготовки із суміжних наук природничого циклу, відсутність методичних і дидактичних матеріалів, досвіду роботи з проблем інтеграції.

Так, автори праць (Сиротюк, 2018, с. 142–143; Шарова, 2007) зазначають, що А.В. Усова у своїх роботах виділяє п'ять основних (узагальнених) способів реалізації інтегрованого підходу у предметах природничого циклу,

зокрема, на уроках фізики, які можна перенести і на вищу школу:

1. Опора на знання, отримані під час вивчення інших дисциплін, наприклад, тема «Атомно-молекулярне вчення», яка вивчалася в «Шкільному курсі фізики» на першому році навчання, буде розглядатися в дисципліні «Загальна хімія».

2. Використання умінь, одержаних раніше під час вивчення суміжних дисциплін, у процесі вирішення завдань або виконання лабораторних дослідів.

3. Розв'язання завдань, що вимагають комплексного застосування знань суміжних дисциплін, а також експериментальних завдань біофізичного та біохімічного змісту. Наприклад, «Вплив вмісту хімічних елементів на ріст і розвиток рослин».

4. Розкриття під час опанування нового матеріалу зв'язків явищ, що вивчаються у суміжних дисциплінах, наприклад: «Електроліз», явище фотоефекту тощо.

5. Використання законів і теорій, які вивчаються в суміжних дисциплінах, для пояснення явищ, конкретизації більш загальних понять, принципів, наприклад: вивчаючи термохімічні процеси, викладач використовує знання з фізики про закон збереження і перетворення енергії.

Синтезуючи навчальний матеріал з фізики, хімії і біології для формування природничо-наукових знань студентів, необхідно звернути увагу на створення передумов, що сприятимуть розвитку навчально-пізнавальної діяльності. Беручи до уваги відсутність у викладачів дисциплін природничого циклу установок на формування природничо-наукових знань студентів, можна припустити, що у більшості випадків процес формування природничо-наукових знань носить стихійний характер. На думку викладачів (Майорова, 2011, с. 76; Сиротюк, 2018, с. 142), основними причинами такої ситуації є:

1) недостатньо знань у галузі природничих дисциплін у викладачів, що не сприятиме чіткому формуванню природничо-наукових знань;

2) недостатня обізнаність про сучасні досягнення у науці;

3) недостатня розробленість цієї проблеми у дидактиці і частинних методиках навчання дисциплін природничого циклу;

4) відсутність розроблених методик і технологій для здійснення процесу формування природничо-наукових знань в студентів;

5) не передбачено в програмі часу на спеціальне встановлення міждисциплінарних зв'язків, що забезпечать формування природничо-наукових знань студентів;

6) природничо-наукові (світоглядні) знання дисциплін природничого циклу є неактуальними в теперішній час;

7) відсутність відповідної навчальної мотивації студентів до вивчення природничих дисциплін.

Програма будь-якої дисципліни повинна не лише націлювати студентів на майбутню професійну діяльність, але й сприяти створенню у них загального бачення світоглядного характеру. Як відомо, фізика є не лише потужним засобом розв'язання прикладних задач і універсальною мовою науки, але також елементом загальної культури.

Нинішні навчальні плани та робочі програми забезпечують реалізацію міждисциплінарних зв'язків під час вивчення основ кожної науки. Міждисциплінарні зв'язки сприяють формуванню синтезуючого мислення студентів, сприяють всебічному вивченню явищ природи. У процесі вивчення фізики та її засобів є можливість розкривати явища, що вивчаються в інших навчальних дисциплінах хімічного і біологічного спрямування. Такий підхід інтегрованого навчання допомагає студентам не лише розширити та поглибити їхні знання, але й перенести ці знання у різноманітні ситуації, формувати у студентів узагальнені поняття, вміння, навички.

Під час викладання фізики для студентів хімічних і біологічних спеціальностей педагогічних університетів необхідно звертати їхню увагу на те, що хімія і біологія у їхній практичній діяльності є потужним засобом для узагальнення фізичних понять та законів. Перебуваючи у таких взаємозв'язках фізика, хімія і біологія займають визначальне місце на перетині їх внутрішніх потреб із розвитком природи та суспільства. Такий перетин зазвичай призводить до важливих відкриттів як у фізиці, так у хімії та біології.

Фізика є апаратом для вираження загальних фізичних закономірностей та методів. Вона розкриває нові фізичні явища і факти та сти-

мулює розвиток хімії і біології постановкою нових завдань.

Наведемо приклади дисциплін хімічного та біологічного спрямування, у яких застосовується матеріал фізичного змісту під час їх вивчення. Для студентів предметної спеціальності 014.06 Середня освіта (Хімія) та спеціальності 102 Хімія, як приклад, візьмемо дисципліну «Загальна хімія». У курсі даної дисципліни за навчальною програмою передбачено вивчення тем, пов'язаних із міждисциплінарним змістом хімії і фізики: «Значення атомно-молекулярного вчення. Основні закони хімії», «Будова атома», «Періодичний закон і періодична система елементів», «Хімічний зв'язок та структура молекул», «Термохімія і термодинаміка хімічних процесів», «Рівновага в хімічних та біологічних системах», «Властивості розчинів неелектролітів», «Властивості розчинів електролітів. Теорія електролітичної дисоціації», «Рівновага в розчинах електролітів», «Електрохімія». Розподіл нормативного змісту матеріалу для студентів хімічного спрямування наведено в табл. 1.

У курсі дисципліни «Загальна хімія» розглянемо вивчення теми «Електрохімія». Дана тема за робочою програмою розрахована на два лекційних заняття. На першому занятті пропонується розглянути питання: «Гальванічні елементи. Робота гальванічних елементів: Данієля-Якобі, Вольта, Леклаше, концентраційних, паливних». «Електрорушійна сила гальванічних елементів». «Застосування гальванічних елементів». Друге заняття пропонується розпочинати з таких питань: «Електроліз як окислювально-відновний процес». «Електроліз розплавів. Закони Фарадея. Електроліз водних розчинів електролітів». «Застосування електролізу. Акумулятори. Принцип роботи акумуляторів: кислотного та лужного». Питання, що виносяться на розгляд лекційних занять, мають міждисциплінарний характер між хімією та фізикою. На таких заняттях студенти хімічних спеціальностей мають можливість краще засвоїти як матеріал фізичного, так і матеріал хімічного характеру.

У результаті вивчення фізики студенти хімічних спеціальностей мають (Тишкова, 2012):

Таблиця 1

Розподіл нормативного змісту матеріалу для студентів хімічного спрямування

Розділи курсу фізики	Матеріал міждисциплінарного змісту	Дисципліна
Механіка	Швидкість. Внутрішнє тертя. В'язкість.	Загальна хімія
Молекулярна фізика і термодинаміка	Дифузія. Сили молекулярної взаємодії. Маса атомів і молекул. Закон збереження маси. Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу (рівняння Клаузіуса). Рівняння стану ідеального газу (Рівняння Клапейрона-Менделєєва). Закон Дальтона. Газові закони. Ізопроеци. Закон Авогадро. Агрегатні стани речовини. Теплоємність молярна теплоємність. Робота і тепло. Внутрішня енергія. Перший закон термодинаміки. Адіабатичний процес. Робота процесів. Рівноважні і нерівноважні процеси. Оборотні та необоротні процеси. Цикл Карно. Другий закон термодинаміки. Ентропія як функція стану. Застосування другого закону термодинаміки для ізольованих систем. Залежність швидкості хімічних та біологічних процесів від тиску та температури системи. Осмос та осмотичний тиск. Роль явища осмосу та осмотичного тиску в біологічних системах та в природі. Поверхнева енергія і поверхневий натяг. Змочування.	Загальна хімія. Фізична і колоїдна хімія. Аналітична хімія
Електрика і магнетизм	Діелектрична проникність. Електричні потенціали. Термоелектричні явища. Контактна різниця потенціалів. Електрорушійна сила. Джерела струму. Енергія активації. Електролітична дисоціація. Електроліз Застосування електролізу. Хімічні джерела струму. Гальванічні елементи. Нормальний елемент Вестона. Акумулятори. Закони Фарадея.	Загальна хімія. Фізична і колоїдна хімія. Загальна хімічна технологія. Аналітична хімія
Оптика	Молекулярні спектри. Оптичні методи дослідження систем. Оптичні властивості систем. Корпускулярно-хвильовий дуалізм.	Загальна хімія. Фізична і колоїдна хімія
Атомна фізика	Вчення про будову атома. Теорія будови атома Н. Бора. Спектральний аналіз та його застосування в науці і техніці. Квантові числа. Принцип Паулі. Періодична система. Д.І. Менделєєва. Екзо- і ендотермічні реакції.	Загальна хімія. Фізична і колоїдна хімія

Розподіл нормативного змісту матеріалу для студентів біологічного спрямування

Розділи курсу фізики	Матеріал міждисциплінарного змісту	Дисципліни біологічного змісту
Механіка	Фізика і жива природа. Роль фізики у розвитку біологічної теорії. Методи вимірювання швидкостей у біологічних системах. Прояв законів Ньютона в живій природі. Сили в живій природі. Реактивний рух і живі організми. Роль реактивного руху для переміщення живих організмів. Механічна робота і потужність людського організму. Робота серця. Ергометрія. Механічні властивості тканин організму людини. Машини та механізми, їх роль у житті людини. Коефіцієнт корисної дії м'язів. Енергія живих організмів. Вплив зміни атмосферного тиску на організм людини. Вимірювання кров'яного тиску. Коливальні процеси в живих організмах. Звуки в живій природі. Фізичні основи слуху. Затухання звукової хвилі в органах слуху. Інфразвуки і ультразвуки в природі. Вплив вібрації на живі організми. Екологічні проблеми акустики.	Біоніка. Загальна екологія. Екологія людини. Зоологія. Фізіологія людини і тварин. Охорона природи
Молекулярна фізика і термодинаміка	Роль дифузії у живій і неживій природі. Роль парціального тиску газу в газообміні. Вплив тиску на швидкість хімічних та біологічних процесів. Вплив температури повітря на живі організми. Температурні межі існування біологічних систем. Терморегуляція організму. Калорійність їжі. Застосування першого закону термодинаміки до біологічних систем. Живі організми і другий закон термодинаміки. Енергетика взаємодії між атомами й молекулами (внутрішня енергія, вільна енергія, ентальпія, ентропія). Ентропія і біологічні об'єкти. Теплові двигуни та охорона навколишнього середовища. Гігієнічне значення вологості повітря. Змочування і незмочування в породі. Роль капілярних явищ в природі. Газова емболія. Роль осмосу в біологічних системах. Теплопровідність тканини організму людини. Способи передачі енергії організмом в оточуюче середовище. Біологічний калориметр.	Біоніка. Молекулярна біологія. Екологія людини. Зоологія. Ботаніка. Фізіологія рослин. Фізіологія людини і тварин. Охорона природи
Електрика і магнетизм	Вплив електричного поля на живі організми. Біопотенціали. Ємність та діелектрична проникність тканин організму. Електропровідність живих організмів. Дія електричного струму на організм людини. Практичне застосування дії електричного струму на організм. Роль електролітів у життєдіяльності організмів. Електричні властивості тканин організму. Вплив магнітного поля на живі організми. Поняття про біомагнетизм і магнітобіологію. Дія електромагнітного поля на живі організми. Застосування імпульсних струмів у медицині. Біоструми. Реєстрація і підсилення біострумів. Вплив електромагнітного випромінювання на живі організми. Електромагнітні хвилі і жива природа. Біологічне значення інфрачервоного випромінювання. Біологічна дія ультрафіолетових променів.	Біофізика. Молекулярна біологія. Біоніка. Фізіологія людини і тварин. Екологія людини
Оптика	Світлові явища в живій і неживій природі. Світло в житті рослин і тварин. Фотометричні величини в біологічних дослідженнях. Веселка. Використання дифракції для дослідження біологічних систем. Явище інтерференції в природних умовах. Дослідження структури тканин в поляризованому світлі. Око як оптична система. Зір як реакція на дію електромагнітного випромінювання оптичного діапазону. Вплив теплового випромінювання на життя тварин і рослин. Люмінесценція біологічних об'єктів. Електрофотоколориметр. Біологічна дія світла. Поняття про фотобіологію. Елементарні фотофізичні процеси. Фотосинтез як приклад перетворення світлової енергії біооб'єктами Роль лазерів у хімічних і біологічних дослідженнях.	Біоніка. Екологія рослин і тварин. Зоологія. Фізіологія людини і тварин. Фізіологія рослин
Атомна фізика	Спектральний аналіз та його застосування в науці і техніці. Застосування спектрального аналізу до біологічних систем. Застосування дифракції рентгенівських променів для дослідження біологічних об'єктів. Ізотопи їх роль у природі і житті людини. Застосування радіоактивних ізотопів. Радіація – добро і зло. Біологічна дія радіоактивного випромінювання на людей.	Біофізика. Екологія людини. Фізіологія людини і тварин. Охорона природи. Радіобіологія

– знати: основні закони фізики, їх роль у природних явищах та техніці;

– мати уявлення:

1) про фізичні основи фізико-хімічних методів аналізу;

2) про фізичні основи роботи найбільш поширених технічних пристроїв;

3) про залежність фізичних властивостей речовини від її хімічної будови;

4) квантово-механічних властивостей будови речовини.

Вміти:

1) розв'язувати задачі з використанням основних законів фізики;

2) працювати з найпростішими фізичними приладами, обробляти результати лабораторного експерименту.

Для студентів спеціальності 091 Біологія як приклад візьмемо дисципліну «Молекулярна біологія». Розподіл нормативного змісту матеріалу для студентів біологічного спрямування приведений у табл. 2.

У курсі дисципліни «Молекулярна біологія» відбувається вивчення теми «Фізико-хімічні основи молекулярної біології». Дана тема відповідно до робочої програми розрахована на одну лекцію. Одним із питань міждисциплінарного змісту фізики і біології даної теми є питання «Енергетика взаємодії між атомами й молекулами». Тут студенти мають можливість скористатися знаннями про внутрішню, вільну енергію, ентальпію та ентропію. Під час розгляду моделі полімерного ланцюга, що складається з певної кількості мономерів, які здатні взаємодіяти між собою, у зовнішнє середовище буде виділятися тепло (знижується внутрішня енергія системи). Як відомо з термодинаміки, усі процеси за інших однакових умов відбуваються в напрямку виділення тепла. Імовірність певного стану системи визначається відношен-

ням ентальпії H (величина, яка за умов постійного тиску та об'єму є еквівалентною внутрішній енергії системи) до середньої кінетичної енергії теплового руху (Сиволоб, 2008, с. 14). У подальшому поясненні спираються на величину S , що залежить від кількості мікростанів, є мірою неупорядкованості системи й називається ентропією, та величину, яка в загальному випадку визначає ймовірність перебування системи в певному стані й, відповідно, напрямок, у якому відбувається той чи інший процес – вільну енергію F ($F=H-TS$) (Сиволоб, 2008, с. 15).

На основі отриманих співвідношень робляться висновки:

1) зміна стану системи відбувається в напрямку зниження вільної енергії;

2) рівноважний стан відповідає мінімуму вільної енергії;

3) зміна вільної енергії залежить від двох складових частин: зміни ентальпії (внутрішньої енергії), яка супроводжується виділенням (поглинанням тепла; зміни ентропії, що характеризує зростання впорядкованості) неупорядкованості в системі (Сиволоб, 2008, с. 15–16).

Висновки і перспективи подальших досліджень. Отже, узгодженість у змісті навчального матеріалу з фізики з іншими дисциплінами природничого циклу дає можливість студентам краще розуміти і засвоювати його. Одночасна опора на знання (факти, поняття, теорію) та методи пізнання з інших природничих дисциплін буде забезпечувати більш усвідомлене сприйняття навчального матеріалу курсу фізики і ні у чому не понижує наукового рівня та практичної спрямованості інших курсів.

Застосування інтеграційних підходів під час вивчення фізики дає студенту новий вид пізнання, що сприяє кращому формуванню та засвоєнню природничо-наукових знань.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Майорова Н.С. Подготовка будущих учителей физики, химии, биологии к формированию естественнонаучной картины мира у школьников : дис ... канд. пед. наук : 13.00.08. Шуя, 2011. 198 с.
2. Сиволоб А.В. Молекулярна біологія : підручник. Київ : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2008. 384 с.
3. Сиротюк В.Д., Сільвейстр А.М., Моклюк М.О. Теоретико-методичні засади засвоєння учнями природничо-наукових знань як необхідна умова навчання фізики майбутніх учителів хімії і біології : монографія. Вінниця : ТОВ «Нілан-ЛТД», 2018. 206 с.
4. Сільвейстр А.М. Теоретико-методичні засади навчання фізики майбутніх учителів хімії і біології : дис. ... доктора пед. наук : 13.00.02. Кропивницький, 2017. 633 с.

5. Каменецкий С.Е., Пурешева Н.С., Вазеевская Н.Е. и др. Теория и методика обучения физике в школе : общие вопросы : учеб. пособие для студ. высш. пед. учеб. Заведений / под ред. С.Е. Каменецкого, Н.С. Пурешевой. Москва : Издательский центр «Академия», 2000. 368 с.
6. Тишкова С.А. Практико-ориентированные технологии при изучении курса общей физики для студентов нефизических специальностей. *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. 2012. № 3(19). С. 167–171.
7. Шарова Н.М. Межпредметные связи при обучении химии. URL: <https://refdb.ru/look/2045153.html>.

REFERENCES:

1. Mayorova, N.S. (2011) Preparation of future teachers of physics, chemistry, biology for the formation of a natural-science picture of the world among schoolchildren: thesis ... cand. ped. sciences: 13.00.08. Shuya [in Russian].
2. Syvolob, A.V. (2008) Molecular biology: a textbook. K.: Publishing and Printing Center «Kyiv University» [in Ukrainian].
3. Syrotiuk, V.D., Silveistr, A.M., Mokliuk, M.O. (2018) Theoretical and methodological principles of students' acquisition of natural science knowledge as a necessary condition for teaching physics to future teachers of chemistry and biology: a monograph. Vinnytsia: Nilan Ltd [in Ukrainian].
4. Silveistr, A.M. (2017) Theoretical and methodological principles of teaching physics to future teachers of chemistry and biology: dis. ... dr. ped. science: 13.00.02. Kropyvnytskyi [in Ukrainian].
5. Kamenetsky, S.E., Puryshcheva, N.S., Vazheevskaya, N.E. and others. (2000) Theory and methods of teaching physics at school: general questions: textbook. allowance for students. higher ped. textbook establishments. Ed. S.E. Kamenetsky, N.S. Puryshcheva. M.: Publishing Center «Academy» [in Russian].
6. Tishkova, S.A. (2012) Practice-oriented technologies in the study of the course of general physics for students of non-physical specialties. *Caspian journal: management and high technologies*. № 3 (19) [in Russian].
7. Sharova N.M. (2007) Interdisciplinary connections in teaching chemistry. [Electronic resource]. Access mode: <https://refdb.ru/look/2045153.html> [in Russian].

УДК 378.147

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-11>

Дмитро СТЕПАНЧИКОВ

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики та охорони праці, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Велика Бердичівська 40, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID ID: 0000-0003-2460-512X

SCOPUS-AUTHOR ID: 6507869772

Регіна ВАСИЛЬЄВА

кандидат педагогічних наук, доцент кафедри фізики та охорони праці, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Велика Бердичівська 40, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID ID: 0000-0002-8190-0048

Бібліографічний опис статті: Степанчиков, Д., Васильєва, Р. (2022). Моделювання процесу радіоактивного розпаду: статистичний підхід. *Фізика та освітні технології*, 1, 87–94, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-11>

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РАДІОАКТИВНОГО РОЗПАДУ: СТАТИСТИЧНИЙ ПІДХІД

Важливу роль у сучасних умовах під час вивчення фізики у закладах вищої освіти відіграє необхідність формування у студентів експериментальної компетентності, в тому числі і засобами інформаційно-комунікаційних технологій. Одним із можливих напрямків цього є розробка та застосування віртуальних комп'ютерних моделей. Розглянуто основні переваги та недоліки використання таких моделей при вивченні фізики.

Запропоновано віртуальну комп'ютерну модель установки для реєстрації радіоактивного випромінювання, що працює у реальному часі і враховує основні статистичні закономірності радіоактивного розпаду. В основу її роботи покладено розрахунок кількості спрацювання детектора за короткі проміжки часу, які підкоряються розподілу Пуассона. Програму було розроблено на мові програмування Delphi. Описано інтерфейс цієї програми та її можливості. Перелічено основні проблеми, пов'язані з необхідністю роботи вказаної програми у режимі реального часу, та шляхи їх вирішення.

Наведено результати віртуального експерименту, в ході якого 200 разів визначалася кількість зареєстрованих імпульсів за 10 с. Проведено дві серії дослідів, що відповідали в середньому 4,6 імпульсам та 46 імпульсам за 10 с. За результатами експерименту визначені середні значення кількості імпульсів за той же проміжок часу та їх абсолютні похибки. Одержані величини в межах похибок збігаються із даними, закладеними у програму. За результатами експерименту побудовано гістограму кількості подій $n_k(k)$, що відповідають певним кількостям імпульсів k . Одержані дані узгоджуються із результатами розрахунків на основі розподілу Пуассона. Продемонстровано, що у другому випадку розподіл Пуассона переходить у розподіл Гауса.

У цілому аналіз результатів показує коректність роботи програми для моделювання установки реєстрації радіоактивного випромінювання. Описано перспективи представленої методики у подальших розробках для створення інших моделей, що працюють у реальному часі.

Ключові слова: віртуальна фізична модель, радіоактивний розпад, радіоактивне випромінювання, розподіл Пуассона, розподіл Гауса.

Dmytro STEPANCHUKOV

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Physic and Labour Protection, Zhytomyr Ivan Franko State University, 40 Velyka Berdychivska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID ID: 0000-0003-2460-512X

SCOPUS-AUTHOR ID: 6507869772

Regina VASYLEVA

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor at the Department of Physic and Labour Protection, Zhytomyr Ivan Franko State University, 40 Velyka Berdychivska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID ID: 0000-0002-8190-0048

To cite this article: Stepanchikov, D., Vasileva, R. (2022). Modeliuvannia protsesu radioaktyvnoho rozpadu: statystychnyi pidkhid [Simulation of the radioactive decay process: a statistical approach]. *Physics and Educational Technology*, 1, 87–94, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-11>

SIMULATION OF THE RADIOACTIVE DECAY PROCESS: STATISTICAL APPROACH

An important role in modern conditions in the study of physics in universities is played by the need to form students' experimental competence, including using information and communication technologies. One of the possible directions is the development and application of virtual computer simulations. The main advantages and disadvantages of using such models in the study of physics are considered.

The proposed virtual computer simulation of radioactive radiation real-time registration setup takes into account the main statistical patterns of radioactive decay. The basis of this work is the calculation of the number of detector activations in short time intervals that obey the Poisson distribution. The application was developed in the Delphi programming language. The interface of this application and its main features are described. The main problems related to the need of real-time work of the mentioned application and ways to solve them are listed.

The results of a virtual experiment are presented, during which the number of registered pulses in 10 seconds was determined 200 times. Two series of experiments were conducted, corresponding to an average of 4.6 pulses and 46 pulses in 10 s. Based on the results of the experiment, the average number of pulses in the same time and their absolute errors were determined. The obtained numbers coincide within the error limits with the data embedded in the application. According to the experimental data, a histogram of the number of events $n_k(k)$ corresponding to certain numbers of pulses k was constructed. The obtained data is matched with the results of calculations based on the Poisson distribution. It is demonstrated that in the second case a Poisson distribution turns into a Gaussian distribution.

In general, the analysis of the results shows the correctness of the application for simulation of radioactive radiation registration setup. The prospects of the presented methodology in further development for the creation of other real-time simulation are described.

Key words: *virtual physical simulation, radioactive decay, radioactive radiation, Poisson distribution, Gaussian distribution.*

Актуальність проблеми. На сучасному етапі модернізації системи освіти в Україні особливої актуальності набувають питання підвищення та розвитку професійної компетентності студентів при навчанні у закладах вищої освіти (ЗВО). Однією з основних компетентностей, що формуються у студентів при вивченні фізики, є експериментальна компетентність (Заболотний, 2015). Важливу роль у реалізації якісного навчання фізики у ЗВО в сучасних умовах відіграють інформаційно-комунікаційні технології, у тому числі моделювання фізичних процесів. Можна виділити такі основні напрямки використання комп'ютерного моделювання у ЗВО: мультимедійна лекція, телекомунікаційний проект та комп'ютерноорієнтований лабораторний практикум (Єчкало, 2016).

Використання віртуальних моделей при викладанні фізики у ЗВО містить ряд переваг: зміна параметрів моделі у значно ширшому діапазоні, ніж дозволяє реальний експеримент; візуалізація об'єктів, які у реальному експерименті спостерігати неможливо, наприклад рух електронів, що особливо важливо при демонстраційному експерименті; виконання віртуального експерименту у випадках, коли реаль-

ний експеримент у ЗВО провести складно або взагалі неможливо; можливість виконання лабораторних робіт студентами за відсутності доступу до обладнання (робота ЗВО під час карантину або військового стану, що є актуальним останні роки; навчання студентів за індивідуальним графіком; відпрацювання пропущених внаслідок хвороби лабораторних робіт).

При цьому ніколи не слід забувати, що віртуальний експеримент не є відображенням реальної фізичної картини світу, а тільки її імітацією. Тому він, не дивлячись на простоту реалізації, не повинен повністю замінити реальний експеримент при вивченні фізики, а тільки його гармонічно доповнити. Викладачу фізики потрібно завжди притримуватися простого правила: віртуальний експеримент використовується тільки у випадку, коли реальний експеримент з тих чи інших причин в заданих умовах є неможливим.

Серед різних розділів загальної фізики найбільше переваг, на наш погляд, дає використання віртуального експерименту при вивченні «Атомної та ядерної фізики», що відображено в роботах різних дослідників (Хомутенко та ін., 2015; Яремчук, 2008; Моклюк та ін., 2015; Козел та ін., 2004). Одним із базових явищ,

з якого власне і почався розвиток ядерної фізики, є радіоактивний розпад.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У 1896 р. А. Беккерель виявив невідоме випромінювання уранілу сульфату калію, яке викликало засвічування фотопластинки, загорнутої у непрозорий для звичайного світла матеріал. Далі було показано, що випромінювання супроводжує радіоактивний розпад – спонтанне перетворення ядер одних елементів у ядра інших елементів (у розглянутому вище випадку спочатку розпаду зазнавали материнські ядра урану, а в подальшому і утворені нестабільні дочірні ядра). Резерфорд продемонстрував, що виявлене випромінювання розділяється на три типи: α -промені (потік ядер гелію ${}^4_2\text{Ra}$), β^- -промені (потік електронів) та γ -промені (потік квантів електромагнітного випромінювання високої енергії). При цьому спостерігається тільки два типи радіоактивного розпаду – α -розпад: ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2\text{He}$ та β^- -розпад: ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e + \tilde{\nu}_e$. Виникнення квантів відбувається при переході дочірніх ядер, утворених при α - та β^- -розпадах, у стани із меншою енергією без перетворення ядер. Подальші дослідження у першій половині 20-го сторіччя виявили і інші, більш екзотичні види радіоактивного розпаду: β^+ -розпад (супроводжується випромінюванням позитрона), К-захоплення (під час розпаду електрон захоплюється із внутрішньої К-оболонки), протонна радіоактивність (супроводжується випромінюванням протона), спонтанний поділ ядер (Кучерук та ін., 1999, с. 421–442).

Радіоактивний розпад може бути описаний законом радіоактивного розпаду, встановленим експериментально у 1903 р. Е. Резерфордом та Ф. Содді:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

де N_0 та N – початкова та кінцева кількість радіоактивних ядер. Величину λ називають сталою радіоактивного розпаду і вона чисельно рівна імовірності розпаду радіоактивного ядра за одиницю часу. Стала радіоактивного розпаду пов'язана із періодом піврозпаду – часом, за який розпадається половина з великої кількості радіоактивних ядер $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$. Активністю радіоактивного препарату називають фізичну вели-

чину, що чисельно рівна кількості розпадів радіоактивних ядер за одиницю часу $A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N$.

Можливості дослідження студентами закономірностей радіоактивного розпаду при виконанні лабораторних робіт пов'язані з рядом труднощів:

1. Наявність радіоактивних речовин. Фактично відносно вільний доступ до таких речовин є тільки в наукових установах, діяльність яких пов'язана із ядерними дослідженнями. Для усіх інших ЗВО найбільш розповсюдженим джерелом радіоактивних речовин можуть виступати фарби, що містять світлосуміші постійної дії (СПД). Такі фарби використовувалися раніше у індикаторах різноманітних приладів, що світилися у темряві, і найчастіше містять ізопоп радію ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ з періодом піврозпаду $T_{1/2} = 1600$ р.

2. Необхідність дотримання усіх необхідних заходів безпеки при роботі з радіоактивними речовинами. При цьому ті ж СПД вважаються безпечними, тільки коли вони знаходяться всередині приладів. Так, наприклад, радій ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ при розпаді випромінює α -частинки, які майже повністю затримуються стінками приладу. Однак це не стосується γ -випромінювання, що супроводжує α -розпад і поглинається стінками приладу лише частково, а біля поверхні приладу може значно перевищувати фонові значення.

3. На першій погляд здається, що безпосередньо дуже легко дослідити закон радіоактивного розпаду (при розпаді одного типу ізопопів), оскільки кількість імпульсів, що реєструє приймальна система, пропорційна активності радіоактивного препарату, яка, у свою чергу, пропорційна кількості радіоактивних ядер. Але для проведення дослідження в рамках однієї лабораторної роботи потрібно мати на момент початку роботи препарати з короткоживучими ізопопами з періодом піврозпаду порядку однієї години. Навіть якщо ця умова буде виконана, то активність такого препарату у порівнянні з ${}^{228}_{88}\text{Ra}$ буде на сім порядків вище при однаковій кількості радіоактивних ядер за рахунок меншого періоду піврозпаду. Це призведе до необхідності застосування жорстких мір радіоактивного захисту, які важко виконати в умовах непрофільних ЗВО.

Використання комп'ютерного моделювання радіоактивного розпаду вивчалось як вітчизня-

ними, так і закордонними дослідниками. Були розроблені демонстраційні комп'ютерні моделі α -розпаду радію, закону радіоактивного розпаду (Моклюк та ін., 2015); анімаційна модель ланцюга радіоактивних розпадів від $^{238}_{92}U$ до $^{206}_{82}Pb$ (Bakri et al, 2021); механічна модель радіоактивного розпаду з використанням кидання монет (Вакаç et al, 2011); симуляції процесу радіоактивного розпаду у Microsoft Excel (Вакаç et al, 2011; Jesse, 2003). Однак динаміка процесу у реальному часі не розглядалася.

Під час проведення у ЗВО лабораторних робіт з курсу «Атомна та ядерна фізика» або аналогічних дисциплін часто пропонуються дослідження у реальному експерименті статистичного характеру процесу радіоактивного розпаду, якій добре проявляється при невеликих кількостях частинок, що фіксуються детектором за час реєстрації (Краснопольова, 2017, с. 27–42). При цьому додатково до вирішення вищеперелічених проблем бажано, щоб детектор не реєстрував фонове випромінювання, внесок якого може бути порівняним із випромінюванням радіоактивного джерела. Також накладаються додаткові умови на електронне обладнання – повинні бути повністю відсутні хибні спрацювання. Якщо усі проблеми одночасно вирішити не вдається, в якості заміни може бути використання комп'ютерної моделі.

Мета дослідження – розробка віртуальної комп'ютерної моделі установки для реєстрації радіоактивного випромінювання, що працює у реальному часі і враховує основні статистичні закономірності радіоактивного розпаду.

Виклад основного матеріалу дослідження. Нехай є радіоактивне джерело з періодом піврозпаду, для якого виконується умова $t_{\text{досл}} \ll T_{1/2}$, де $t_{\text{досл}}$ – загальний час проведення експерименту. Тоді можна вважати, що за весь час проведення експерименту кількість радіоактивних ядер практично не змінюється. Результат розпаду ядер реєструється у вигляді одиничних імпульсів детектором, наприклад лічильником Гейгера-Мюлера. Для спрощення будемо вважати, що спрацювання детектора викликає один тип частинок, наприклад γ -кванти. Час реєстрації імпульсів Δt також малий $\Delta t \ll T_{1/2}$. За цей час у середньому за результатами великої кількості однотипних вимірювань повинно бути зареєстровано таку кількість імпульсів:

$$\mu = C \left| \frac{dN}{dt} \right| \Delta t = C \lambda \Delta t N = pN, \quad (2)$$

де $0 < \square < 1$ – коефіцієнт, що чисельно рівний імовірності спрацювання детектора частинок при розпаді одного ядра. Він враховує, що не всі частинки, які виникають під час радіоактивного розпаду, досягнуть детектора, і тільки частина з останніх може викликати спрацювання детектора. Величина $p = C \lambda \Delta t$ представляє собою імовірність розпаду за час Δt та подальшої реєстрації детектором певного ядра. Оскільки за зазначеною вище умовою період піврозпаду повинен бути великим, то p буде дуже малим. Водночас кількість радіоактивних ядер N є дуже великою, а середня кількість імпульсів μ за час Δt згідно з (2) може бути скінченою величиною, порівняною з одиницею. Тоді імовірність реєстрації детектором k імпульсів за час Δt може бути визначена за формулою Пуассона (Кушлик-Дивульська, 2014):

$$p_k = \frac{\mu^k}{k!} e^{-\mu}. \quad (3)$$

При цьому повинно виконуватися співвідношення $\sum_{k=0}^{\infty} p_k = 1$.

При проведенні достатньо великої кількості n однотипних вимірювань повинно виконуватися співвідношення $\mu = \bar{k}$. Дисперсія величини k у випадку розподілу Пуассона також становить $D(k) = \bar{k}$, а середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного рівне:

$$\Delta k = \sigma(\bar{k}) = \sqrt{\frac{D(k)}{n}} = \sqrt{\frac{\bar{k}}{n}}. \quad (4)$$

Якщо виконується умова $\mu > 9$, імовірність реєстрації детектором k імпульсів за час Δt може бути наближено описана за допомогою функції розподілу Гауса $\phi(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\mu}} e^{-\frac{(k-\mu)^2}{2\mu}}$:

$$p_k = \int_k^{k+1} \phi(k) dk. \quad (5)$$

Для програмної реалізації мультимедійної комп'ютерної моделі установки для реєстрації радіоактивного випромінювання була використана мова програмування Delphi (пакет RAD Studio 10.4). При запуску програми з'являється вікно, у якому студент може вибрати номер варіанту, з яким у програмі зв'язано певне зна-

чення величини μ_0 (з розрахунку на час $\Delta t_0 = 10$ с). Величини μ_0 задаються у вигляді масиву і після компіляції програми змінюватися не можуть, але варіантів можна передбачити багато (в оригінальній програмі варіантів було 10, але цим числом їх кількість не обмежується). Після вибору варіанту автоматично з'являється основне вікно програми (рис. 1). У ньому представлено схематичне зображення лічильника Гейгера-Мюлера. В основному вікні програми студент може зробити дві дії: змінити час роботи лічильної системи $\Delta t_{\text{вим}}$ (за замовчуванням 10 с) та запустити її натиснувши кнопку «Старт». Після цього починається рахунок імпульсів. Назва кнопки «Старт» змінюється на «Стоп», і при натисканні на неї роботу лічильника можна зупинити. При початку розрахунку біля поля «Залишилось» вказується час повного виміру і починається зворотній відлік часу. При реєстрації нового імпульсу значення у полі «Кількість імпульсів» збільшується на одиницю (на початку відліку автоматично встановлюється нульове значення). Одночасно із цим спалахує індикатор «Лічильник імпульсів».

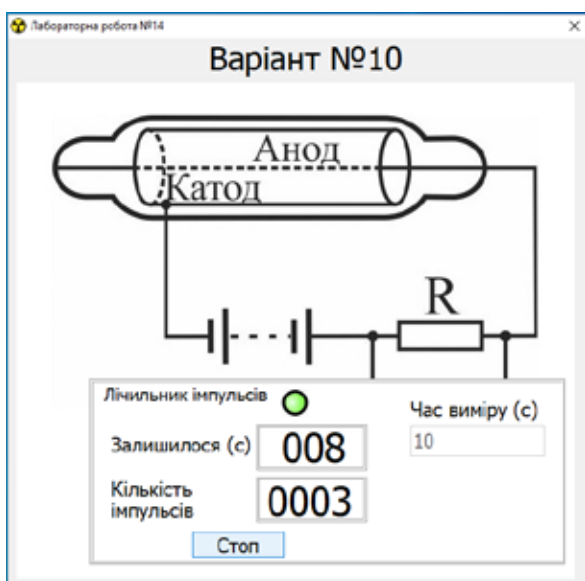


Рис. 1. Основне вікно програми моделювання установки для реєстрації радіоактивного випромінювання

Для реалізації роботи в реальному часі було створено 4 об'єкти TTimer, які можуть ініціювати через заданий проміжок часу у мілісекундах переривання для виконання спеціальної підпрограми. Один із таймерів використовувався тільки для зупинки відліку через заданий

на початку проміжок часу, другий спрацьовував через 1 с та використовувався для зміни стану поля «Залишилось» при зворотному відліку часу.

Для моделювання реєстрації окремих імпульсів, що можна спостерігати візуально, час відліку повинен бути достатньо малим. Нами він задавався у $\Delta t_{\text{відл}} = 50$ мс. Через цей проміжок спрацьовував третій таймер. Розраховувалося середнє значення кількості імпульсів за цей проміжок:

$$\mu_{\text{відл}} = \frac{\Delta t_{\text{відл}}}{\Delta t_0} \mu_0, \quad (6)$$

і на основі цього визначалася імовірність появи $0, 1, 2, \dots, k_{\text{max}}$ імпульсів згідно із співвідношенням (5). Хоча значення k_{max} теоретично може прямувати до нескінченності, у програмі ставилося обмеження $k_{\text{max}} = 100$. Оскільки в даній моделі значення μ_0 не перевищувало 100, то $\mu_{\text{відл}}$ не перевищувало 0,5. Отже, імовірність реєструвати за цей час більше 10 імпульсів була близька до нуля, а значення k_{max} вибрано з великим запасом, розрахованим на значно інтенсивніший потік частинок.

Далі розраховувалася сумарна імовірність P_k появи не більше k імпульсів $P_k = \sum_{k=0}^{k_{\text{max}}} p_k$. Нами приймалося, що $P_{k_{\text{max}}+1} = 1$. У Delphi є вбудована функція `random()`, яка видає випадкове число $x \in [0,1]$. За одержаним значенням x визначалася кількість зареєстрованих імпульсів k на даному інтервалі часу. Для шуканого k повинна виконувалася умова $P_k \leq x < P_{k+1}$.

У першій реалізації програми після розрахунку k при його ненульовій величині запалювався індикатор «Лічильника імпульсів» (на наступному перериванні за відсутності нових імпульсів переводився у вимкнений стан) та збільшувалися покази «Кількості імпульсів» на величину k . Тестування показало, що значення μ за 10 с, одержане в експерименті з моделлю, було на 30-40% меншим, ніж задано у самій моделі. Це свідчило про те, що або імпульси рахуються некоректно, або реальний час $\Delta t_{\text{відл}}$ неправильно визначається.

Дійсно малі часи перериванні таймерів можуть відрізнитися від заданого, що пов'язано з реалізацією відносно довготривалих дій у підпрограмі обробки переривань, а також залежить від зовнішніх дій, що виконує комп'ютер

за межами переривання. У такому випадку пропонують винести за межі тіла переривання усі некритичні дії. Тому нами в тілі обробки третього таймера було залишено лише те, що пов'язано з розрахунком кількості імпульсів за вказаний проміжок часу. Обробка усіх візуальних ефектів проводилася в перериванні четвертого таймера через кожні 100 мс.

Розбіжність між вимірним та заданим значенням μ зменшилася, але значно перевищувала похибку експерименту. Це свідчило про необхідність розрахунку реальних проміжків часу між перериваннями. Для цього була використана спеціальна процедура *QueryPerformanceCounter* (Z), яка повертає у значенні Z кількість «тіків» (синхронізмпульсів внутрішнього таймера) з моменту включення комп'ютера. Вбудована змінна *QueryPerformanceFrequency* визначає частоту цього таймера. Це дало можливість більш точно визначити час між двома сусідніми перериваннями:

$$\Delta t_{\text{відл}} = \frac{Z_i - Z_{i-1}}{\text{QueryPerformanceFrequency}}, \quad (7)$$

та під час кожного переривання проводити розрахунки з урахуванням скоригованого часу згідно (7), (6) та (3).

Під час виконання лабораторної роботи студентами проводилося n разів вимірювання кількості імпульсів, що реєструє система за однаковий час $\Delta t_{\text{вим}}$, вказаний викладачем. Аналізуючи одержані дані, визначали кількість подій n_k , яка відповідала реєстрації за час $\Delta t_{\text{вим}}$ k частинок, де $k = 1, 2, 3, \dots$. При цьому повинно виконуватися співвідношення $\sum_{k=1}^{k_{\text{max}}} n_k = n$, де k_{max} – найбільше значення кількості частинок, зареєстрованих під час усього експерименту за час $\Delta t_{\text{вим}}$.

За результатами експерименту також обчислюється середнє значення кількості зареєстрованих за час $\Delta t_{\text{вим}}$ частинок:

$$\bar{k}_{\text{експ}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{k_{\text{max}}} n_k k, \quad (8)$$

та абсолютна похибка, в ролі якої бралася середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного:

$$\Delta k_{\text{експ}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^{k_{\text{max}}} n_k (k - \bar{k}_{\text{експ}})^2}. \quad (9)$$

Далі будується гістограма залежності кількості подій n_k від значення k . На ній же для порівняння наводять побудований по точках графік теоретично розрахованих кількостей подій $n_k^{\text{теор}} = p_k n$, де p_k розраховується для $\mu = \bar{k}_{\text{експ}}$ за формулою Пуассона (3). Для наочності точки можна з'єднувати плавною лінією, але фізичний зміст мають саме точки, оскільки значення $k \in Z$.

Для демонстрації можливостей моделі був проведений віртуальний експеримент для двох різних значень μ . При $\mu = 4,6$ за результатами $n = 200$ вимірювань за проміжок часу $\Delta t_{\text{вим}} = 10$ с було отримано, що $\mu_{\text{експ}} = k_{\text{експ}} = \bar{k}_{\text{експ}} \pm \Delta k_{\text{експ}} = 4,68 \pm 0,16$. Теоретичне значення середнього квадратичного відхилення середнього арифметичного згідно з (4) $\Delta k_{\text{теор}} = 0,15$, що також є близьким до експериментального. На рис. 2 представлена гістограма залежності кількості подій n_k від кількості зареєстрованих частинок k та результати розрахунку (точки) за формулою Пуассона.

При $\mu = 46$ за результатами $n = 200$ вимірювань за проміжок часу $\Delta t_{\text{вим}} = 10$ с, було отримано близьке експериментальне значення $\mu_{\text{експ}} = 45,5 \pm 0,5$. Теоретичне значення середнього квадратичного відхилення середнього арифметичного збігається з експериментальним $\Delta k_{\text{теор}} = 0,5$. На рис. 3 представлена відповідна гістограма за даними експерименту та результати розрахунку (точки) за формулою Пуассона. Також для порівняння наведено результати розрахунку (точки) за на основі розподілу Гауса (5), які майже збігаються з розрахунком за формулою Пуассона.

Одержані результати у другому випадку свідчать про те, що кількість вимірювань $n = 200$ можна вважати достатнім для визначення $\mu_{\text{експ}}$. Але для більш якісного аналізу залежності кількості подій $n_k(k)$ загальну кількість вимірювань бажано збільшити.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Одержані результати показують, що запропонована віртуальна комп'ютерна модель установки для реєстрації радіоактивного випромінювання відображає основні статистичні закономірності радіоактивного розпаду та може бути ефективно використана як для проведення лабораторних робіт, так і для демонстраційного експерименту.

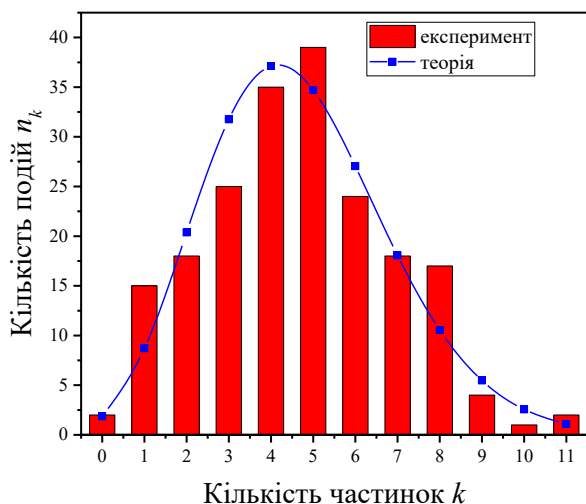


Рис. 2. Залежність кількості подій n_k від кількості зареєстрованих частинок k при наступних параметрах експерименту $\mu=4,6$, $n=200$, $\Delta t_{вим}=10$ с.

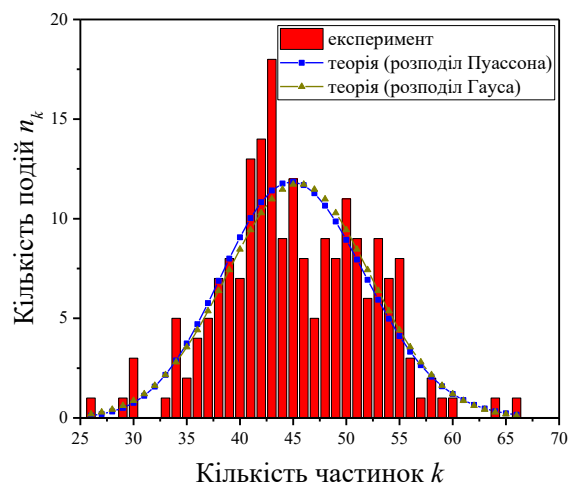


Рис. 3. Залежність кількості подій n_k від кількості зареєстрованих частинок k при наступних параметрах експерименту $\mu=46$, $n=200$, $\Delta t_{вим}=10$ с.

У подальшому планується використати її як базу для розробки віртуальних лабораторних робіт, в основі яких лежить реєстрація радіоактивного випромінювання – моделювання дослі-

дів Резерфорда з розсіяння α -частинок тонкою металевією фольгою, вивчення особливостей роботи лічильника Гейгера-Мюлера, дослідження поглинання α - та β -випромінювання.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Заболотний В.Ф., Демкова В.О. Експериментальна компетентність як складова професійної підготовки студентів. *Вісник Чернігівського національного педагогічного університету. Серія: Педагогічні науки.* 2015. Вип. 127. С. 49–52.
2. Єчкало Ю.В. Методи навчання комп'ютерного моделювання фізичних процесів і явищ у вищій школі. *Вісник Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького. Серія: Педагогічні науки.* 2016. № 7. С. 127–134.
3. Хомутенко М.В., Садовий, М.І, Трифонова О.М. Комп'ютерне моделювання процесів в атомному ядрі. *Інформаційні технології і засоби навчання.* 2015. № 45, вип. 1. С. 78–92.
4. Яремчук О.М. Педагогічні ідеї вивчення штучної радіоактивності (з використанням засобів комп'ютерного моделювання). *Наукові праці Миколаївського державного гуманітарного університету ім. Петра Могили комплексу Києво-Могилянська академія. Сер.: Педагогічні науки.* 2008. № 97, вип. 84. С. 36–39.
5. Моклюк М., Моклюк О., Лисий, М. Вивчення явища радіоактивності за допомогою засобів комп'ютерного моделювання. *Наукові записки [Кіровоградського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка]. Серія: Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти.* 2015. Вип. 8(2). С. 115–119.
6. Козел В.М., Степанчиков Д.А., Федьович М.В. Демонстраційний експеримент на екрані комп'ютера. *Вісник ЖДПУ.* 2004. № 14. С. 95–100.
7. Bakri F., Sumardani D., Mulyati, D. Radioactive decay model based on augmented reality. *Journal of Physics: Conference Series.* 2021. Vol. 1869, No. 1, P. 012192.
8. Вакаç М., Таşođlu А. К., Uyumaz G. Modeling radioactive decay. *Procedia Social and Behavioral Sciences.* 2011. Vol. 15, P. 2196–2200.
9. Jesse K. E. Computer Simulation of Radioactive Decay. *The Physics Teacher.* 2003. Vol. 41. P. 542–543.
10. Загальний курс фізики. Т. 3. Оптика. Квантова фізика / І.М. Кучерук та ін. ; за ред. І.М. Кучерука. Київ : Техніка, 1999. 520 с.
11. Краснопорова А.П., Южно Г.Д. Лабораторний практикум. Основи радіохімії та радіоекології: методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів хімічного факультету. Харків : ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2017. 106 с.
12. Теорія ймовірностей та математична статистика : навч. посіб. / О.І. Кушлик-Дивульська та ін. Київ : НТУУ «КП», 2014. 212 с.

REFERENCES:

1. Zabolotnyi, V.F., & Demkova, V.O. (2015). Eksperymentalna kompetentnist yak skladova profesiinoi pidhotovky studentiv [Experimental competence as a component of professional training of students]. *Visnyk Chernihivskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu. Serii: Pedahohichni nauky – Bulletin of the Chernihiv National Pedagogical University. Series: Pedagogical sciences*, 127, 49-52 [in Ukrainian].
2. Iechkalo, Yu.V. (2016). Metody navchannia kompiuternoho modeliuvannia fizychnykh protsesiv i yavyshech u vyshchii shkoliy [Methods of teaching computer modeling of physical processes and phenomena in higher education]. *Visnyk Cherkaskoho natsionalnoho universytetu imeni Bohdana Khmelnytskoho. Serii: Pedahohichni nauky – Bulletin of the Cherkasy National University named after Bohdan Khmelnytskyi. Series: Pedagogical sciences*, 7, 127-134 [in Ukrainian].
3. Khomutenko, M.V., Sadovyi, M.I., & Tryfonova O.M. (2015). Kompiuterne modeliuvannia protsesiv v atomnomu yadri [Computer simulation of processes in the atomic nucleus]. *Informatsiini tekhnologii i zasoby navchannia – Information technologies and teaching aids*, 45(1), 78-92 [in Ukrainian].
4. Iaremchuk, O.M. (2008). Pedahohichni idei vyvchennia shtuchnoi radioaktyvnosti (z vykorystanniam zasobiv kompiuternoho modeliuvannia) [Pedagogical ideas for studying artificial radioactivity (using computer simulation tools)]. *Naukovi pratsi Mykolaivskoho derzhavnogo humanitarnoho universytetu im. Petra Mohyly kompleksu Kyievo-Mohylianska akademiia. Ser.: Pedahohichni nauky – Scientific works of Mykolaiv State Humanitarian University named after Peter Mohyla of the Kyiv-Mohyla Academy complex. Series: Pedagogical sciences*, 97(84), 36-39 [in Ukrainian].
5. Mokliuk M., Mokliuk O., & Lysyi, M. (2015). Vyvchennia yavyshecha radioaktyvnosti za dopomohoiu zasobiv kompiuternoho modeliuvannia [Study of the phenomenon of radioactivity using computer simulation tools]. *Naukovi zapysky [Kirovohradskoho derzhavnogo pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Vynnychenka]. Serii: Problemy metodyky fizyko-matematychnoi i tekhnolohichnoi osvity. – Scientific Notes [Kirovohrad State Pedagogical University named after Volodymyr Vinnichenko]. Series: Problems of the methodology of physical, mathematical and technological education*, 8(2), 115-119 [in Ukrainian].
6. Kozel, V.M., Stepanchikov, D.A., & Fedovych, M.V. (2004). Demonstratsiinyi eksperyment na ekrani kompiutera [Demonstration experiment on the computer screen]. *Visnyk ZhDPU – Bulletin of the ZSPU*, 14, 95-100 [in Ukrainian].
7. Bakri F., Sumardani D., & Mulyati, D. (2021). Radioactive decay model based on augmented reality. *Journal of Physics: Conference Series*, 1869(1), 012192 [in English].
8. Bakaç, M., Taşoğlu, A.K., & Uyumaz G. (2011). Modeling radioactive decay. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 15, 2196-2200 [in English].
9. Jesse K.E. (2003) Computer Simulation of Radioactive Decay. *The Physics Teacher*, 41, 542-543 [in English].
10. Kucheruk, I.M., & Horbachuk I.T. (1999) Zahalnyi kurs fizyky. T.3. Optyka. Kvantova fizyka [General course of physics. Vol.3. Optics. Quantum physics] I.M. Kucheruk (Ed.). Kyiv: Tekhnika [in Ukrainian].
11. Krasnoporova, A.P., & Yukhno, H.D. (2017). Laboratornyi praktykum. Osnovy radiokhimii ta radioekolohii [Laboratory practice. Basics of radiochemistry and radioecology]. Kharkiv: KhNU im. V.N. Karazina [in Ukrainian].
12. Kushlyk-Dyvulska, O.I., Polishchuk N.V., Orel, B.P., & Shtabaliuk P. I. (2014). Teoriiia ymovirnostei ta matematychna statystyka [Probability theory and mathematical statistics]. Kyiv: NTUU "KPI" [in Ukrainian].

УДК 378.147:53

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-12>

Оксана СТЕЦЮК

аспірантка кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0003-3250-6359

Бібліографічний опис статті: Стецюк, О. (2022). Формування дослідницьких компетентностей при навчанні фізики на засадах STEM-освіти. *Фізика та освітні технології*, 1, 95–100, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-12>

ФОРМУВАННЯ ДОСЛІДНИЦЬКИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ ПРИ НАВЧАННІ ФІЗИКИ НА ЗАСАДАХ STEM-ОСВІТИ

Формулювання проблеми. У статті проаналізовано проблему розробки теоретико-методичних засад формування дослідницьких умінь в учнів засобами STEM-технологій на основі компетентнісного підходу. Зроблено аналіз останніх досліджень і публікацій у науково-педагогічній літературі щодо методології формування дослідницьких умінь на засадах STEM-освіти на основі компетентнісного підходу при навчанні фізики. Визначено, що в науково-педагогічній літературі відсутній однозначно визначений підхід до методології формування дослідницьких умінь на засадах STEM-освіти на основі компетентнісного підходу при навчанні фізики.

Мета дослідження: вивчення теоретико-методологічних аспектів феномена «дослідницька компетентність на засадах STEM-освіти».

Матеріали і методи. Упродовж підготовки статті були використані такі методи дослідження: порівняльний аналіз теоретичних положень опрацьованої наукової та навчально-методичної літератури; спостереження за освітнім процесом з фізики вітчизняної школи.

Наукова новизна. Розкрито роль STEM-технологій у формуванні дослідницьких умінь в ході діяльності учнів над реалізацією STEM-проектів при вивченні фізики за допомогою інформаційно-комунікаційних технологій.

Визначено що при проведенні дослідження з фізики в форматі STEAM-освіти можуть бути розглянуті проблеми, пов'язані з екологією при експлуатації технічних установок; прикладними аспектами фізики у сфері технологій, виробництва, медицини, спорту; ціннісними аспектами життя людини, у тому числі безпеки життєдіяльності та здоров'я, охороною навколишнього середовища. Акцентовано увагу на тому, що використання даних технологій не тільки поєвляє її урізноманітнює навчальний процес, а й відкриває великі можливості для розширення освітніх рамок, а також, безсумнівно, несе в собі величезний мотиваційний потенціал і сприяє принципам індивідуалізації навчання.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Уведення основних компонентів STEM-освіти до навчальних програм з фізики дає змогу створити найоптимальніше середовище для виявлення та розвитку дослідницьких компетентностей школярів. Дослідницька діяльність за сучасних умов розвитку та трансформації освітньої галузі може бути визнана в якості потужного засобу реалізації особистісного потенціалу старших підлітків. Саме STEM-освіта надає можливості для розвитку дослідницьких вмінь учнів і тому, беззаперечно, є актуальним напрямком розвитку національної освіти.

Ключові слова: STEM-освіта, компетентнісна модель STEM-навчання фізики, проектна діяльність, початковий проект, формування дослідницької компетентності.

Оксана STETSIUK

Postgraduate Student at the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0003-3250-6359

To cite this article: Stetiuk, O. (2022). Formuvannia doslidnytskykh kompetentnostei pry navchanni fizyky na zasadakh STEM-osvity [Formation of research competences in teaching physics on the basis of STEM education]. *Physics and Educational Technology*, 1, 95–100, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-12>

FORMATION OF RESEARCH COMPETENCES IN TEACHING PHYSICS ON THE BASIS OF STEM-EDUCATION

Formulation of the problem. The article analyzes the problem of developing the theoretical and methodological foundations of the formation of research skills of students by means of STEM-technologies based on the competence approach. An analysis of the latest research and publications in the scientific and pedagogical literature on the methodology of formation of research skills on the basis of STEM-education based on the competence approach in teaching physics was made. It was determined that in the scientific and pedagogical literature there is no unambiguously defined approach to the methodology of formation of research skills on the basis of STEM-education based on the competence approach in teaching physics.

The purpose of the study: the study of theoretical and methodological aspects of the phenomenon "research competence on the basis of STEM-education".

Materials and methods. During the preparation of the article, the following research methods were used: comparative analysis of the theoretical provisions of the developed scientific and educational and methodological literature; observation of the educational process in physics at the national school.

Scientific novelty. The role of STEM-technologies in the formation of research skills during the activities of students on the implementation of STEM-projects in the study of physics with the help of information and communication technologies is revealed.

It was determined that when conducting physics research in the STEAM-education format, problems related to ecology during the operation of technical installations can be considered; applied aspects of physics in the field of technology, production, medicine, sports; valuable aspects of human life, including safety and health, environmental protection. Attention is focused on the fact that the use of these technologies not only enlivens and diversifies the educational process, but also opens up great opportunities for expanding the educational framework, and also, undoubtedly, carries a huge motivational potential and contributes to the principles of individualization of education.

Key words: STEM-education, competence-based model of STEM-teaching physics, project activity, educational project, formation of research competence.

Актуальність проблеми. Сьогодні випускники школи в рамках впровадження ЗНО мають можливість вибрати свій навчальний маршрут, що відображає динаміку становлення й розвитку інтересів учнів – від захопленості до компетентного професійного самовизначення. Усе це зумовлює необхідність перегляду підходів до організації навчання й виховання, серед яких пріоритетними стають використання активних методів навчання і їх елементів на основі принципів сучасного розвитку фізичної освіти. «Особливого значення набувають завдання формування компетентностей особистості в умовах наскрізної інтеграції в чотирьох напрямках: наука, технології, інженерія, математика та визначення умов формування науково-орієнтованої освіти на основі модернізації математично-природничих та гуманітарних профілів освіти» (Pedrada, 2019, с 14). Це сприяє пошуку методів, що стимулюють пізнавальну діяльність учнів, втягують кожного з них у розумову й поведінкову активність і спрямовані на усвідомлення, відпрацювання, збагачення й особистісне прийняття наявного знання кожним учнем. Навчальний фізичний експеримент на основі STEM-технологій є обов'язковим його елементом і одночасно невід'ємною складовою частиною методики навчання фізики як наукової дисципліни, здатної забезпечити ефективно засвоєння знань суб'єктами навчання. Тому при вивченні фізики широко

застосовується залучення школярів у проектну та дослідницьку діяльність.

Таким чином, постає проблема розробки теоретико-методичних засад формування дослідницьких умінь в учнів засобами STEM-технологій на основі компетентнісного підходу, що дозволить учню самостійно здобувати та застосовувати знання, приймати рішення, планувати свої дії, ефективно працювати над досліджуваною проблемою на основі STEM-підходу, бути відкритими до нових знань та технологічних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальні основи впровадження компетентнісного підходу в заклади загальної середньої освіти висвітлювалися у працях таких вчених, як Н. Бібік, І. Бех, І. Єрмаков, Л. Ващенко, О. Локшина, О. Овчарук, О. Пометун, Л. Паращенко, О. Савченко, С. Трубочева та ін. На думку Н. Бібік, Л. Ващенко, О. Локшиної, О. Овчарук, О. Пометун, Л. Паращенко, О. Савченко, дослідницька компетентність – «інтегральна якість особистості, що виражається в готовності і здатності до самостійного пошуку вирішення нових проблем і творчого перетворення дійсності на основі сукупності особистісно усвідомлених знань, умінь, навичок, способів діяльності і ціннісних установок» (Bibik, 2004, с 15). І. Бех вважає що «трактування поняття компетентність дуже широке...» (Bekh, 2009, с. 5). Компетентний у широкому розумінні – «це той, хто має знання, обізнаний

в певній галузі»; «у вузькому розумінні – той, хто має право авторитетного судження як фахівець високого рівня в певному колі питань» (Vekh, 2009, с. 5).

О. Пометун розглядає «компетентнісний підхід як спрямованість освітнього процесу на формування загальної компетентності людини, яка має сформуватися в процесі навчання та включати знання, уміння, ставлення, досвід діяльності й поведінкові моделі особистості, може бути реалізованим і перевіреном у процесі виконання конкретною особистістю певного комплексу дій. Компетентнісний підхід потребує трансформації змісту освіти, перетворення його з моделі, яка існує об'єктивно для всіх, на суб'єктивні надбання однієї, конкретної особи, надбання, що їх можна виміряти» (Pometun, 2004, с. 66).

Теоретичні та методологічні питання реалізації STEM-освіти прослідковуються в напрацюваннях таких педагогів, як: І. Василяшко, Н. Гончарова, Н. Балик, Г. Шмигер, В. Черноморець та ін. І. Василяшко вважає, що STEM-вчитель здатний «організувати освітній процес як педагогічну взаємодію, спрямовану на розвиток особистості дитини, її підготовку до розв'язання завдань життєтворчості» (Petrykeieva, 2019, с. 26). На думку Н. Балик, Г. Шмигер, основні особливості сучасної STEM-освіти – це «інтегроване навчання, розвиток навичок критичного мислення та вирішення проблем, активна комунікація і командна робота, креативні та інноваційні підходи до створення проєктів, підготовка дітей до технологічних інновацій життя, застосування науково-технічних знань у реальному житті. ... перехід від традиційного навчання до інноваційного шляхом використання проєктного, практикоорієнтованого навчання, перевернутого та змішаного навчання, хмарних технологій та технології WEB 2.0, мейкерства» (Balyk, 2017, Shmyher, 2017, с. 26–30).

Отже, в науково-педагогічній літературі відсутній однозначно визначений підхід до методології формування дослідницьких умінь на засадах STEM-освіти на основі компетентнісного підходу при навчанні фізики.

Мета дослідження: вивчення теоретико-методологічних аспектів феномена «дослідницька компетентність на засадах STEM-освіти».

Виклад основного матеріалу. Одним із провідних підходів ST(R)E(A)M-освіти є проєктна діяльність. «Запровадження ST(R)E(A)M-проєктів демонструє учням можливість застосування науково-технічних знань у реальному житті за допомогою практичних занять. На таких уроках плануються, розробляються моделі сучасної індустрії: учні створюють міні-проєкти, намагаються запропонувати власну модель; аналізують, роблять висновки, пов'язують її з життєвими ситуаціями, з власним досвідом» (Tantseva, 2018, с. 2–7).

Розглянемо питання реалізації дослідницького вміння в ході діяльності учнів над реалізацією STEM-проєктів при вивченні фізики за допомогою інформаційно-комунікаційних технологій, оскільки вони дозволяють створити певний продукт у різних формах (презентації, газети, відеоролики), що є обов'язковою й відмінною рисою проєкту. При виконанні проєктів із фізики учні представляють результати у вигляді мультимедійної презентації, аудіо-або відеозвіту, реальних математичних моделей фізичних явищ і технічних пристроїв. На відміну від традиційної системи оцінювання, де ми оцінюємо кінцевий результат, технологія проєктного навчання на основі STEM підходу дозволяє простежити динаміку процесу формування системи універсальних навчальних дій учнів, а учням зв'язок створеного в ході проєкту продукту з реальним життям. На практиці така проєктна діяльність реалізується на уроці, в позаурочній та в ході експериментаторсько-дослідницької роботи учнів. Проєктна технологія на основі STEM підходу формує в учнів досвід самостійного пізнання нового, інтеграції знань до вирішення життєвих проблем, створення практично значимого навчального продукту. У процесі виконання STEM-проєкту, вирішуючи практично або теоретично значиму проблему, учні отримують результат у формі досвіду діяльності із застосування теоретичних знань в соціальному середовищі. Проєктний метод як освітня технологія спрямований на засвоєння компетентнісного досвіду, а здобути компетентність можна лише при самостійному вирішенні проблем, пошуку знань, необхідних для розв'язання поставленого завдання. Компетентність – продукт не навчання, а спрямованого навчанням саморозвитку учня. Будь-яка компетентність має ще й комунікативний

аспект – спілкування з партнерами, передача їм своєї точки зору і прийняття їх поглядів. У даному випадку проектний метод навчання з елементами STEM-дослідження – це одна з технологій створення ситуації розвитку особистості. Навчальна проблема (задача), що вимагає використання STEM-проєкту, – це життєво значуще питання, що не має однозначного вирішення, що вимагає залучення знань із різних навчальних дисциплін, із власного життєвого досвіду або їх добування в результаті дослідження. «Формування дослідницьких умінь засобами проектної діяльності при STEM-навчанні фізики передбачає набуття учнями функціональної навички дослідження як універсального способу освоєння дійсності, розвитку здатності до дослідницького типу мислення, активізацію особистісної позиції учня в освітньому процесі на основі придбання суб'єктивно нових знань» (Henov-Steshenko, 2009, с. 73–78).

Відповідно до вищезазначеного при проведенні дослідження у форматі STEAM-освіти при вивченні фізики можуть розглядатися проблеми, пов'язані з екологією при експлуатації технічних установок; прикладними аспектами фізики у сфері технологій, виробництва, медицини, спорту; ціннісними аспектами життя людини, у тому числі безпеки життєдіяльності та здоров'я, охороною навколишнього середовища. Створювати продукти проектної діяльності допомагають сучасні інформаційні технології. Використання даних технологій не тільки поживає й урізноманітнює навчальний процес, а й відкриває великі можливості для розширення освітніх рамок, а також, безсумнівно, несе в собі величезний мотиваційний потенціал і сприяє принципам індивідуалізації навчання. Сама по собі проектна діяльність дозволяє учням виступати в ролі авторів, творців, підвищує творчий потенціал, розширює не лише загальний кругозір, але й сприяє поглибленню предметних знань.

Застосування ІКТ у проектній діяльності дозволяє навчити учня самостійно працювати з інформацією, отриманою з різних джерел, створювати графічні об'єкти, використовувати електронні таблиці. Робота над STEM-проєктом є творчою за своєю суттю. Творчість передбачає наявність в особистості творчих здібностей, використання величезних можливостей усережжя, а також отримання й застосування

на практиці знань і вмінь, завдяки яким створюється продукт, що відрізняється новизною, оригінальністю й унікальністю. На всіх етапах виконання проєкту зручно використовувати пакет програм Microsoft Office, Publisher, таблиці процесори або електронні таблиці (Excel), графічні редактори (Paint, Corel Draw), електронні енциклопедії, Інтернет, різні онлайн-сервіси для створення презентацій (WikiWall, Magnoto, Realtime Board, Padlet, Prezi), а також сервіси Google. Нижче розглянемо приклади таких STEM проєктів. **Тема «Випаровування і його вплив на життєдіяльність людини».** Проєкт належить до практико-орієнтованих і спрямований на вивчення процесів випаровування й кипіння. У ході роботи над проєктом будуть поєднані дисципліни: хімія, фізика, біологія, інформатика. Дана тема має практичне значення, оскільки розглянуті процеси впливають на організм людини, але для детального їх вивчення необхідна модель. Програми Macromedia Flash, Sony Vegas сприяють цьому. Спочатку в програмі Macromedia Flash створюється анімація – «жива картинка», що показує динаміку процесу, потім у програмі Sony Vegas можна накласти звук, ефекти, зробити різні написи, перегортання файлів.

Тема «Яка структура речовини?» Проєкт поглиблює й розширює вже наявні в учнів основні відомості з курсу фізики, біології, хімії, математики за рахунок самостійного пошуку додаткового матеріалу, виконання експериментально дослідження. У ході виконання даного проєкту учні систематизують і узагальнюють знання з молекулярної фізики, розглядають питання виникнення атомістичної гіпотези будови речовини і її експериментальне підтвердження, будову і властивості твердих тіл. Метою проєкту є формування в учнів розуміння матеріальності світу; умінь ставити й вирішувати проблеми; здійснювати комунікацію різними способами, у тому числі й за допомогою засобів мультимедіа; працювати самостійно з великим об'ємом інформації та переносити її з однієї галузі знань в іншу. Для досягнення даної мети передбачається розв'язання таких завдань: вивчити науково-популярну літературу з теми проєкту; створити комп'ютерні моделі структур молекул деяких речовин і різних кристалів, провести дві дослідні роботи («Груба оцінка розмірів молекул рослинного масла», «Виро-

щування кристалів»). Робота з підготовки проєкту здійснюється за допомогою сервісу Google «Документи», учні обмінюються інформацією, відкриваючи доступ редагування документа. Результат оформляють за допомогою сервісу Google «Презентації». Перевага даного сервісу полягає в тому, що учні мають можливість здійснювати спільну діяльність, вчать взаємодіяти в команді. Електронні таблиці Excel дозволяють графічно вирішувати фізичні задачі.

При вивченні розділу «Кінематика» учням 10-го класу пропонується міжпредметний практико-орієнтований проєкт на тему «Як описати рух тіл?», який реалізується на уроках фізики, математики та інформатики. У ході проєкту учні освоюють методи опису механічного руху з використанням інформаційних технологій, саме електронних таблиць. У результаті виконання проєкту учні створюють математичні моделі руху. Сервіс wikiwall дозволяє представляти результат діяльності у вигляді стінгазети.

Наведемо приклад проєкту на тему «Невідомий світ магнітного поля», в ході роботи над яким необхідно буде використати знання отримані на уроках біології, географії, фізики. У ході роботи над проєктом учням пропонується розглянути такі рубрики:

1. Прояв магнітного поля в повсякденному житті.
2. Історія відкриття магнітних взаємодій. Бібліографічна довідка про вчених.
3. Експерименти, які доводять матеріальність магнітного поля (провести самостійно й подати фото- або відеозвіт). Даний сервіс може використовуватися й для систематизації знань. Так,

на початку вивчення розділу учням пропонується наступна структура газети: історичні довідки (розглядається історія відкриття явищ, біографії вчених); наукові досягнення (сучасні розробки в даній області); упровадження (практичні розробки, опис технологічних пристроїв і установок, що працюють на підставі, розглянутих закономірностей). Дану стінгазету учні презентують на заліковому занятті.

Таким чином, Інтернет і мультимедійні технології розширюють можливості проєктної діяльності учнів і, поряд із предметними знаннями, формують систему компетентностей, а саме: інформаційну (володіння прийомами роботи з різними джерелами інформації, перетворення, збереження і обробка за допомогою інформаційних технологій); комунікативну (володіння навичками роботи в групі при організації віртуальної взаємодії засобами інтернет-технологій і сервісів).

Висновки і перспективи подальших досліджень. Дослідницька діяльність за сучасних умов розвитку та трансформацій освітньої галузі може бути визнана в якості потужного засобу реалізації особистісного потенціалу старших підлітків. Саме STEM-освіта надає можливості для розвитку дослідницьких умінь учнів і тому, беззаперечно, є актуальним напрямком розвитку національної освіти.

Перспективу подальших досліджень вбачаємо в аналізі вітчизняних та зарубіжних надбань з проблеми запровадження STEM-освіти та розробці системи формування експериментаторсько-дослідницьких умінь на засадах STEM-навчання фізики.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Балик Н.Р., Шмигер Г.П. Підходи та особливості сучасної STEM-освіти. *Фізико-математична освіта*. 2017. Вип.2. С. 26-30. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/fmo_2017_2_6.
2. Бібік Н.М. Компетентнісний підхід: рефлексивний аналіз застосування. Компетентнісний підхід у сучасній освіті: світовий досвід та українські перспективи: Бібліотека з освітньої політики / за ред. О.В. Овчарук. Київ, 2004. С. 45–50.
3. Бех І.Д. Теоретико-прикладний сенс компетентнісного підходу у педагогіці. *Виховання і культура*. 2009. № 12. С. 5–7.
4. Генів-Стешенко О.В., Сосницька Н.Л. Дидактичні засади застосування методу проєктів для формування ключових компетентностей учнів у процесі навчання фізики: наукові записки / Серія: педагогічні науки. Кіровоград, РВВ КДПУ ім. В. Винниченка. Вип. 82. Ч. 2, 2009. С. 73–78.
5. Компетентнісний підхід у сучасній освіті: світовий досвід та українські перспективи: Бібліотека з освітньої політики / Н.М. Бібік та ін ; за ред. О.В. Овчарук. Київ, 2004. 112 с.
6. Патрикєва О.О., Лозова О.В., Горбенко С.Л., Василяшко І.П. Організація STEM-навчання у закладах освіти. *Проблеми освіти*: збірник наукових праць. Вінниця, ДНУ «Інститут модернізації змісту освіти». Вип. 91, 2019. С. 109–115.

7. Педрада. Портал освітян України: веб-сайт. URL: <https://www.pedrada.com.ua/news/703-stem-osvita-vukrayini-vid-doshkilnika-do-kompetentnogo-vipusknika> (дата звернення: 11.03.2019).
8. Пометун О.І. Дискусія українських педагогів навколо питань запровадження компетентнісного підходу в українській освіті. Компетентнісний підхід у сучасній освіті : Світовий досвід та українські перспективи. Київ, 2004. С. 66–72.
9. Танцева О.О. Упровадження STEM-проектів у навчально-виховний процес: шляхи подолання труднощів. *Управління школою*. 2018. № 22(574). С. 2–7.
10. Фіцула М.М. Педагогіка. Тернопіль : Богдан, 2005. 232 с.

REFERENCES:

1. Balyk, N.R., & Shmyher, H.P. (2017). Pidkhody ta osoblyvosti suchasnoi STEM-osvity [Approaches and features of modern STEM education]. *Fyzyko-matematychna osvita – Physical and mathematical education*, 2, 26-30 Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/fmo_2017_2_6 [in Ukrainian].
2. Bibik, N. M. (2004). Kompetentnisnyi pidkhid: refleksivnyi analiz zastosuvannya [Competency approach: reflective analysis of application]. O. V. Ovcharuk (Eds.), *Kompetentnisnyi pidkhid u suchasni osviti: svitovy dosvid ta ukrainski perspektyvy – Competency approach in modern education: world experience and Ukrainian perspectives: Library of educational policy*. (pp. 45 – 50). Kyiv [in Ukrainian].
3. Beh, I. D. (2009). Teoretyko-prukladnyi sens kompetentnisnogo pidkhodu u pedagogitsi [Theoretical and applied meaning of the competence approach in pedagogy]. *Vykhovannia I kultura – Education and culture*, 12, 5–7 [in Ukrainian].
4. Henov-Steshenko, O.V., & Sosnytska, N.L. (2009). Dydaktychni zasady zastosuvannya metodu proektiv dlia formuvannya kliuchovykh kompetentnostei uchniv u protsesi navchannia fizyky [Didactic principles of application of the method of projects for the formation of key competencies of students in the process of teaching physics]. *Proceedings: pedahohichni nauky – pedagogical sciences*. (pp. 73-78). Kirovohrad: RVV KDPU im. V. Vynnychenka [in Ukrainian].
5. Bibik, N. M. (2004) Kompetentnisnyi pidkhid u suchasni osviti: svitovy dosvid ta ukrainski perspektyvy [Competency-based approach in modern education: world experience and Ukrainian perspectives]. O. V. Ovcharuk (Eds.), *Kompetentnisnyi pidkhid u suchasni osviti: svitovy dosvid ta ukrainski perspektyvy – Competency approach in modern education: world experience and Ukrainian perspectives: Library of educational policy*. (pp. 84-86). Kyiv [in Ukrainian].
6. Patrykeieva, O.O., & Lozova, O.V. (2019). Orhanizatsia STEM-navchannia u zakladakh osvity [Organization of STEM-education in educational institutions]. *Collection of scientific works: Problemy osvity – Problems of education*. (pp. 109-115). Vinnytsia: DNU « Instytut modernizatsii zmistu osvity» [in Ukrainian].
7. Pedrada. Portal osvitian Ukrainy [Pedrada Portal of educators of Ukraine]. (n.d.). [pedrada.com.ua/news](https://www.pedrada.com.ua/news) Retrieved from <https://www.pedrada.com.ua/news/703-stem-osvita-vukrayini-vid-doshkilnika-do-kompetentnogo-vipusknika> [in Ukrainian].
8. Pometun, O. I. (2004). Dyskusiiia ukrainskykh pedahohiv navkolo pytan zaprovadzhennia kompetentnisnogo pidkhodu u ukrainskii osviti [Discussion of Ukrainian pedagogues about the question of implementation of competence approach in Ukrainian education]. O. V. Ovcharuk (Eds.), *Kompetentnisnyi pidkhid u suchasni osviti: svitovy dosvid ta ukrainski perspektyvy – Competency approach in modern education: world experience and Ukrainian perspectives: Library of educational policy* (pp. 66-72). Kyiv [in Ukrainian].
9. Tantsseva, O.O. (2018). Uprovadzhennia STEM-proiektiv u navchalno-vykhovnyi protses: shliakhy podolannia trudnoshchiv [Implementation of STEM-projects in the educational process: ways to overcome difficulties]. *Upravlinnia shkoloiu – School management*, 22, 2-7 [in Ukrainian].
10. Fitsula, M. M. (2005). *Pedagogika [Pedagogy]*. Ternopil: Bogdan [in Ukrainian].

UDC 539.104:537.311.33:621.315.5

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-13>

Petro TROKHIMCHUCK

Ph.D., Associate Professor Associate Professor at Department of A.V. Svidzynskiy's Theoretical and Computer Physics, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0003-2737-0506

SCOPUS-AUTHOR ID: 8383601100

To cite this article: Trokhimchuck, P. (2022) Main problems of modeling laser-induced breakdown of matter. *Physics and Education Technology*. 1, 101–106, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-13>

MAIN PROBLEMS OF MODELING LASER-INDUCED BREAKDOWN OF MATTER

The main problems of modeling the laser-induced breakdown of matter are discussed. We show that this problem must be represented as resolution of famous Newtonian phrase: "Optics studies the processes associated with the transition of light into matter and matter into light." Short analysis of main kinetic and dynamic processes is analyzed. Photoinduced and photochemical processes are represented kinetic phenomena. Thermal and plasma processes – dynamic phenomena. Unlike electrical breakdown, which can be superficial, laser-induced breakdown occurs in a medium that is transparent to the incident radiation. Therefore, we present the main differences between electrical and laser-induced breakdown. These processes are accompanied of phase transformations of irradiated matter. These processes have saturation nature. We show that these process have cascade nature. Therefore, basic problem of modeling is find the corresponding chain of interconnected phenomena, which are generated in the process of interaction the light and matter. Short analysis of corresponding models, which are used for the explanation of main peculiarities of electrical and laser-induced breakdown, are represented. These phenomena have threshold nature. Therefore, we selected experimental data of creation laser-induced optical breakdown for silicon carbide and potassium chloride. The proper cascade model was created. This model includes next stages: diffraction stratification (modified model of Rayleigh rings); generation of Cherenkov radiation on each cone of corresponding diffraction ring (synthesized Golub and Niels and Aage Bohrs models); interference of short-wave part of Cherenkov radiation; optical breakdown in maximum of this interferograms. At the same time, the emergence of nanocavities in breakdown channels was explained on the basis of a modified Rayleigh model. It was also established that this shock process has electromagnet nature.

Key words: laser, optical breakdown, Relaxed Optics, cascade processes, shock processes, modeling.

Петро ТРОХИМЧУК

кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0003-2737-0506

SCOPUS-AUTHOR ID: 8383601100

Бібліографічний опис статті: Трохимчук, П. (2022). Основні проблеми моделювання лазерно-індукованого оптичного пробую речовини. *Фізика та освітні технології*, 1, 101–106, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-13>

ОСНОВНІ ПРОБЛЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ЛАЗЕРНО-ІНДУКОВАНОГО ОПТИЧНОГО ПРОБІЮ РЕЧОВИНИ

Обговорюються основні проблеми моделювання лазерно-індукованого руйнування речовини. Ми показуємо, що ця проблема повинна бути представлена як розв'язання знаменитої фрази Ньютона: «Оптика вивчає процеси, пов'язані з переходом світла в матерію і матерії у світло». Проаналізовано короткий аналіз основних кінетичних і динамічних процесів. Фотоіндуковані та фотохімічні процеси представлені кінетичними явищами. Теплові та плазмові процеси – динамічні явища. На відміну від електричного пробую, який може бути поверхневим, лазерний пробій відбувається в середовищі, прозорому для падаючого випромінювання. Тому ми представляємо основні відмінності між електричним та лазерним пробієм. Ці процеси супроводжуються фазовими перетвореннями опроміненої речовини. Також вони мають характер насичення. Показано, що ці процеси мають каскадний характер. Тому основною задачею моделювання є пошук відповідного ланцюга взаємопов'язаних

явищ, які генеруються в процесі взаємодії світла та матерії. Подано короткий аналіз відповідних моделей, які використовуються для пояснення основних особливостей електричного та лазерного пробую. Ці явища мають пороговий характер. Тому ми відібрали експериментальні дані створення лазерно-індукованого оптичного пробую для карбиду кремнію та хлориду калію. Була створена відповідна каскадна модель. Ця модель включає такі етапи: дифракційна стратифікація (модифікована модель кілець Релея); генерація черенковського випромінювання на кожному конусі відповідного дифракційного кільця (синтезована модель Голуба та Н. та О. Борів); інтерференція короткохвильової частини черенковського випромінювання; оптичний пробій в максимумі цієї інтерферограми. Водночас появу нанопорожнин у каналах пробую було пояснено на основі модифікованої моделі Релея. Також встановлено, що цей ударний процес має електромагнітну природу.

Ключові слова: лазер, оптичний пробій, релаксаційна оптика, каскадні процеси, ударні процеси, моделювання.

INTRODUCTION

Problems of the observation the laser-induced optical breakdown and shock processes in matter as Nonlinear (NLO) and Relaxed (RO) Optical processes are connected with acoustic (thermal) and electromagnetic (plasma and Nonlinear optical) nature (Shen, 2003; Trokhimchuck, 2020; Trokhimchuck, 2022). These processes may be connected with diffractive stratification of laser beam, self-focusing, self-trapping, generation of supercontinuum radiation (ordered – Cherenkov radiation, and disorder – plasma radiation) (Trokhimchuck, 2020; Trokhimchuck, 2022).

The first models were created similar to the electric breakdown of matter (Lehr, 2017). Unlike laser breakdown, electrical breakdown can be both bulk and surface (current lacing in semiconductors). The main problems of these models were to find the mechanisms of electron avalanche generation. Then thermal and plasma models were developed.

For laser-induced optical breakdown of the medium, the problem of electron generation must be associated with photochemical excitation and reactions that lead, as a rule, to phase transitions of the irradiated substance. Therefore, we must find possible channels of transformation initial laser radiation to ended irradiation or other action, which is generated the breakdown.

These phenomena are having the threshold and saturation nature and full process is complex cascade with few stages of various phenomena.

Therefore, main problem of this paper is selection the most significant concentrations and processes that give the greatest contribution to the final effect.

EXPERIMENTAL DATA

A good review of experimental results on the electrical breakdown of the medium is given in (Okada, 2009; Okada, 2012; Yablonovich, 1971).

A number of typical destructions of real transparent media have been experimentally revealed (Okada, 2009; Okada, 2012):

– destruction of the surface of glass or quartz structural parts (plates, prisms, lenses) with the appearance of opaque macroscopic local formations;

– destruction of thin-film metal and dielectric mirror coatings in the presence of an opaque defect in the coating or the appearance on the surface of dust or other opaque macroscopic local formations;

– destruction inside the glass, crystals, active elements that occur on macroscopic local impurities or defects that are inside this environment.

More complex experimental data, which are included optical breakdown, were received in (Okada, 2009; Okada, 2012) (Fig. 1).

Sectional area of receiving structures was $\sim 22 \mu\text{m}$, the depth of $\sim 50 \mu\text{m}$. As seen from Fig. 1 (c) we have five stages disordered regions, which are located at a distance from 2 to 4 μm apart vertically (Okada, 2009; Okada, 2012). Branches themselves in this case have a thickness from 150 to 300 nm. In this case there are lines in the irradiated nanocavity spherical diameter of from 10 nm to 20 nm. In this case irradiated structures have crystallographic symmetry of the initial structure.

In this case diffraction processes may be generated in two stages: 1 – formation of diffraction rings of focused beams (Trokhimchuck, 2020) and second – formation of diffracting gratings in the time of redistribution of second-order Cherenkov radiation (Trokhimchuck, 2020). Second case is analogous to the creation of self-diffraction gratings in NLO, but for Fig. 1 (c) and Fig. 1 (e) our gratings are limited by Much cone of Cherenkov radiation. Roughly speaking only Fig. 1 (e) – (g) are represented “clean” breakdown.

Two damages region in a crystal with moderately high density of inclusions were received in (Yablonovich, 1971) for KCl after irradiation by CO₂-lase pulses (wavelength 10,6 μm , duration of pulse 30 ns). The laser was known to be operating in the lowest-order transverse Gaussian mode. There were several longitudinal modes, however,

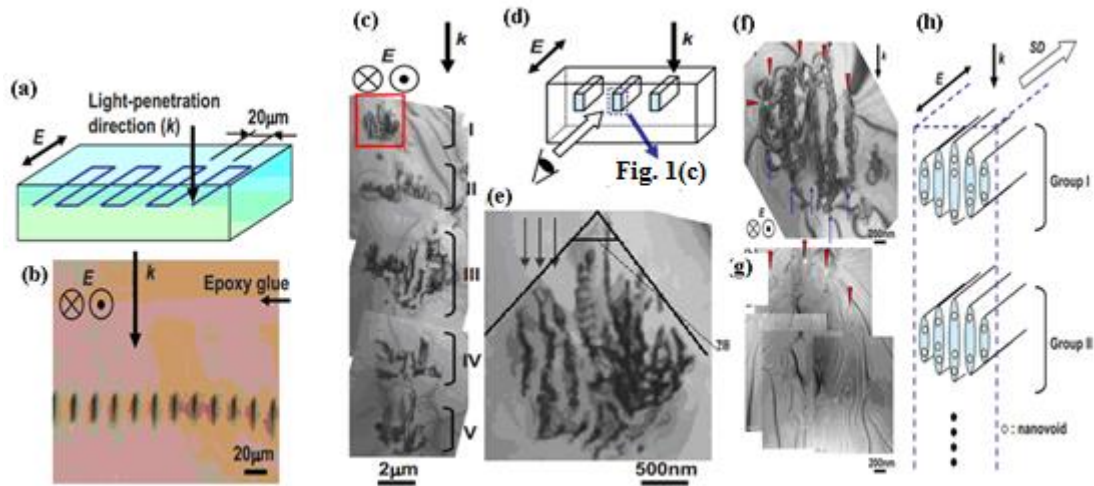


Fig 1. (a) Schematic illustration of the laser irradiated pattern. The light propagation direction (k) and electric field (E) are shown. (b) Optical micrograph of the mechanically thinned sample to show cross sections of laser-irradiated lines (200 nJ/pulse). (c) Bright-field TEM image of the cross section of a line written with pulse energy of 300 nJ/pulse. (d) Schematic illustration of a geometric relationship between the irradiated line and the cross-sectional micrograph. (e) Magnified image of a rectangular area in (c). Laser-modified layers with a spacing of 150 nm are indicated by arrows. (f) Bright-field TEM image of a portion of the cross section of a line written with a pulse energy of 200 nJ/pulse. (g) Zero-loss image of a same area as in (f) with nanovoids appearing as bright areas. Correspondence with (f) is found by noting the arrowheads in both micrographs. (h) Schematic illustrations of the microstructure of a laser modified line. Light-propagation direction (k), electric field (E), and scan direction (SD) are shown. Only two groups (groups I and II) of the laser-modified microstructure are drawn (Okada, 2009; Okada, 2012)

which contributed a time structure to the pulse, periodic at the cavity round-trip time. The phase relationships between the longitudinal modes varied from shot to shot, changing the details of the time structure and causing the peak of the envelope to fluctuate by $\pm 15\%$ (Yablonovich, 1971). These results are presented in Fig. 2 (Yablonovich, 1971).

Successive laser shot (1/sec) were focused into bulk single crystals using a 1-inch focal length “Irtran 2” lens. The breakdown was monitored by observing the visible light from the focal region and by examining the damaged region under the microscope. It was found that most of the crystals suffered some damage even at relatively low power levels. The threshold of this type of damage varied by an order magnitude from one position in the crystal to another. At any particular energy level, damage would occur on the first laser shot or not at all.

Fig. 2(a) shows that spatial inhomogeneities are in fact inclusions (Yablonovich, 1971). The damage bubbles occur randomly near, not necessarily in, the tiny focal volume. At a well-defined power

threshold, an elongated pointed bubble forms, its vertex falling at the focus (Fig. 2(b)). This power level is regarded as the bulk intrinsic breakdown threshold. Its value is reproducible in crystals from different manufacturers, with inclusions or without. When no inclusion-free samples of a compound were available, the considerations mentioned above were used to determine the dielectric strength (Yablonovich, 1971).

MODELING AND DISCUSSIONS

Main characteristic of electrical breakdown is critical value of voltage, which is necessary for realization of this process (Lehr, 2017; Fröhlich, 1946; Wang, 2012). Depending on the conditions of the experiment, a plasma or thermal breakdown mechanism can be realized there. These theories were transferred to the problem of laser-induced optical breakdown [Shen, 2003; Trokhimchuck, 2020]. But with the help of these theories, it is difficult to explain the experimental results shown in Fig. 1 and Fig. 2.

For the optical breakdown of a solid body, each atom needs to be given Seitz energy (the sum of the

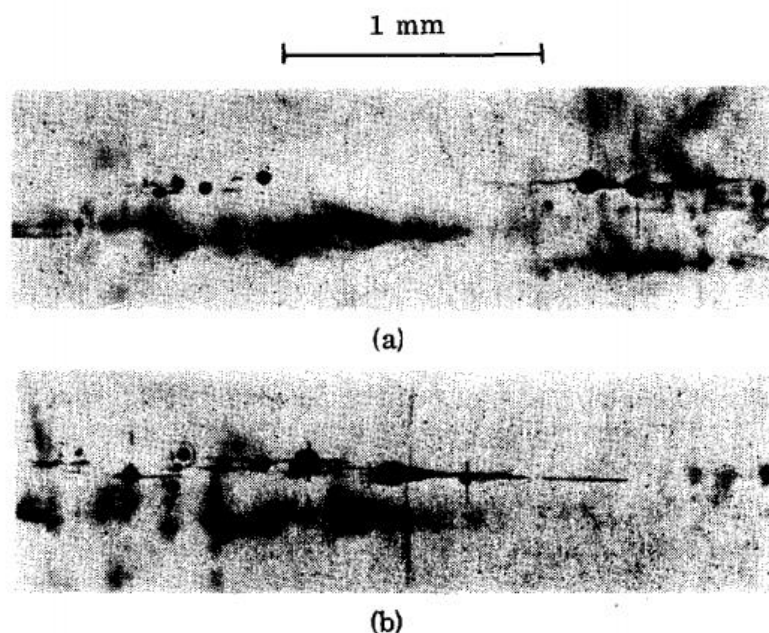


Fig. 2. Two damages region in a crystal *KCl* with moderately high density of inclusions. The round black objects are bubbles. The radiation, incident from left to right, was just at the intrinsic breakdown threshold. In one case (a) there was damage only at the inclusions. In (b), intrinsic breakdown occurred as evidenced by the pointed bubble. The straight lines represent cleavage (Yablunovich, 1971)

energies of the chemical bonds of our atom with its nearest neighbors) (Trokhimchuck, 2020). But for this, we must "organize" the irradiation process in such a way that this mechanism is implemented. It is here that we must remember Newtonian phrase: "Optics studies the processes associated with the transition of light into matter and matter into light."

Based on this, we chose the following chain of processes: diffraction stratification, Cherenkov radiation by each diffraction cone (the components of the Mach cone of this radiation are perpendicular to the components of the diffraction cone); interference of the short-wave part of this radiation; optical breakdown occurs in the maxima of the interference pattern.

In addition, an adapted Rayleigh model was created to simulate the size and shape of the nanovoids formed in the breakdown channels (Fig. 1 h)).

Diffraction stratification was modeled with help Rayleigh rings. Diameter of corresponding ring is equaled (Trokhimchuck, 2020; Trokhimchuck, 2022)

$$d_{ndif} = n\lambda \quad (1)$$

where n – number of ring, λ – wavelength of initial laser irradiation.

The number of diffraction rings may be determined from experimental data (five for Fig. 1 c) and ~ 7 for Fig. 2. This number may be determined theoretically with Durbin model (Trokhimchuck, 2020).

This leads to a local refractive-index change $\Delta n(\rho, z)$ in the medium seen by the laser and a corresponding phase shift $\Delta\psi$ of the beam traversing the medium of thickness d :

$$\Delta\psi(\rho) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{-d/2}^{d/2} \Delta n(\rho, z) dz, \quad (2)$$

where ρ is transverse position in the beam. For this geometry $\Delta n(\rho, z)$ and $\Delta\psi(\rho)$ also correspond, respectively, to the induced local birefringence and overall phase retardation between ordinary and extraordinary rays. For a single transverse-mode laser, and supposing the elastic response of the liquid crystal to be isotropic, we expect that $\Delta\psi(\rho)$ is cylindrically symmetric in the form of a bump peaked at $\rho = 0$. We assume, for simplicity, that (Trokhimchuck, 2020)

$$\Delta\psi(\rho) = \Delta\psi_0 \exp\left(-2\rho^2/a^2\right), \quad (3)$$

with a being a constant. Then, as is seen in Fig. 2.4, for each point, say ρ_1 , on the $\Delta\psi(\rho)$ function, there always exists another point ρ_2 with the

same slope. Since $\frac{d\Delta\Psi}{d\rho} = k_{\perp}$, the radiation fields from the regions around ρ_1 and ρ_2 have the same wave vector and can interfere. Maximum constructive or destructive interference occurs when $\Delta\Psi(\rho_1) - \Delta\Psi(\rho_2) = m\pi$, m being an even or odd integer, respectively, with the resulting appearance of diffraction rings. Thus, if $\Delta\Psi_0 \gg 2\pi$, multiple diffraction rings are expected, and the total number of rings N can be estimated from the relation

$$N \cong \frac{\Delta\Psi_0}{2\pi}. \quad (4)$$

The outermost ring should come from radiation from the region ρ around the inflection point on the $\Delta\Psi(\rho)$ curve, and its half-cone angle θ_m can be calculated from (Trokhimchuck, 2020)

$$\theta_m \cong \left(\frac{d\Delta\Psi}{d\rho} \right)_{\max} / \left(2\pi/\lambda \right). \quad (5)$$

For modeling conic Cherenkov radiation we used synthesis microscopin Niels and Aage Bohrs and macroscopic Golub models (Trokhimchuck, 2020). This models allow to unite geometry characteristics and changed of lasser-induced nonlinear characteristics matter in one formula. In this case the Cherenkov radiation is result of nonlinear polarization of medium.

The angle 2θ in the vertex of an angle of Fig. 1 (e) is double Cherenkov angle.

Macroscopic relation with Snell's law, gives the Cherenkov relation (Golub formula) (Trokhimchuck, 2020).

$$\cos\theta = \frac{c}{n_2(\omega)V}. \quad (6)$$

Where c – light velocity, $n_2(\omega)$ – nonlinear refraction undex, V – velocity of nonlinear polarization of matter.

The microscopic mechanism of laser-induced Cherenkov radiation is expansion and application of Niels and Aage Bohrs microscopic theory of Cherenkov radiation as part of deceleration radiation on optical case (Trokhimchuck, 2020). For optical case the Bohrs hyperboloid must be changed on Gaussian distribution of light for mode TEM_{00} or distribution for focused light of laser beam (Trokhimchuck, 2020). In this case Cherenkov angle may be determined from next formula

$$\theta_{Ch} + \alpha_{ir} = \pi/2 \text{ or } \theta_{Ch} = \pi/2 - \alpha_{ir}, \quad (7)$$

where α_{ir} – angle between tangent line and direction of laser beam.

Angle α_{ir} was determined from next formula (Trokhimchuck, 2020)

$$\tan \alpha_{ir} = \frac{d_b}{l_{sf}}, \quad (8)$$

where d_b – diameter of laser beam, (7 mm), l_{sf} – length of self-focusing. In our case α_{ir} is angle of self-focusing.

This formula is approximate for average angle α_{ir} .

The Golub formula (6) was used for the determination product $n_2(\omega)V_{nl\ pol}$. Thereby microscopic modified Bohrs theory and macroscopic Golub model are mutually complementary methods (Trokhimchuck, 2020).

The distance between diffraction spots and proper moving foci may be determined with help next formula (Trokhimchuck, 2020)

$$l_{nf} = \frac{d_{ndif}}{2 \tan \Phi/2}. \quad (9)$$

The influence of multi-photon absorption on the dielectric breakdown threshold was noted as early as in the Fröhlich (Fröhlich, 1946; Wang, 2012).

For the estimation basic peculiarities of energy distribution in Mach cone of Fig. 1 c) may be used next formula [2]

$$E_{1ob} = \frac{\pi^2}{4} \left(\sum_{i=1}^5 n_{iav}^2 l_{iav} \right) r^2 N_{aSiC} E_{Zth}, \quad (10)$$

where n_{iav} – average visible number of filaments in proper group of cascade, $l_{iav} = 1000 \text{ nm}$ – average length of filaments in proper group of cascade, $r = 10 \text{ nm}$ – average radius of filament, N_a – atom density of 4H-SiC.

Therefore, summary energy of breakdown E_{1ob} for silicon carbide is equaled 23.3 nJ or ~ 8% from pulse energy or ~ 30% from the effective absorbed energy of pulse. In this case we have more high efficiency of transformation initial radiation to “irreversible” part of Cherenkov radiation. For potassium chloride from 24.2 mJ (Fig. 2a) to 34.8 mJ (Fig. 2 b)) or from 11,6 to 17,4 percents from initial irradiation [2]. This is due to the dependence of the sizes of diffraction cones and other geometrical dimensions on the wavelength of irradiation (formulas (1) and (9)).

For the determination sizes and forms of nano-voids (Fig. 1 h)) we used the Rayleigh model,

which was adapted for electromagnetic case (Trokhimchuck, 2020).

For the estimations of maximal radius of nanovoids we must use modified Rayleigh formula (Trokhimchuck, 2020)

$$R_{\max} = \frac{2R}{0.915r} \sqrt{\frac{E_{ir}}{\pi\tau_{ir}cE}}, \quad (11)$$

where T_c – the time of creation the nanovoid (bubble), R is radius of nanovoid, r – radius of irradiated zone, E – Young module, E_{ir} – energy of one pulse. τ_{ir} – duration of pulse (Trokhimchuck, 2020).

If we substitute $r = 250 \text{ nm}$, $R = 10 \text{ nm}$, $E=600 \text{ GPa}$ [176, 212, 273], $E_{ir}=130 \text{ nJ}$, $\tau_i = 130 \text{ ps}$, $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, than have $R_{\max}=11 \text{ nm}$.

The velocity of shock waves for femtosecond regime of irradiation is less as speed of sound. But we have two speeds of sound in elastic body:

longitudinal ϑ_{ls} and transversal ϑ_{ts} (Trokhimchuck, 2020). Its values are determined with next formulas

$$\vartheta_{ts} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho_o(1+\nu)(1-2\nu)}}, \text{ and } \vartheta_{ls} = \sqrt{\frac{E}{2\rho_o(1+\nu)}}, \quad (12)$$

where ν – Poisson's ratio (Trokhimchuck, 2020). The ratio between of these two speeds is equaled

$$\alpha = \frac{\vartheta_{ts}}{\vartheta_{ls}} = \sqrt{\frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}}. \quad (13)$$

But this ratio must be true for shock waves too. Therefore, for silicon carbide for $\nu = 0,45$ [2] $\alpha = 0,33$. Roughly speaking last ratio is determined the step of ellipsoidal forms of our nanovoids (Fig. 1 (h)).

CONCLUSIONS

1. A comparative analysis of electric and laser-induced breakdown of solids (experimental data and modelling) was carried out.
2. It is shown that the laser-induced optical breakdown of matter has a cascade nature.
3. The presented cascade model, which includes diffraction stratification, generation of Cherenkov radiation, interference of the short-wavelength region of this radiation, and actual optical breakdown, allows to explain the main features of this process.
4. It is shown that the formation of nanocavities is caused by electromagnetic shock processes.
5. In general, the laser-induced optical breakdown itself from a microscopic point of view is caused by multiphoton absorption and the saturation effect of the excitation of the irradiated region.

REFERENCES:

1. Fröhlich, H. H. (1946) On the theory of dielectric breakdown in solids. Proc. Roy. Soc. A, vol. 187, pp. 521–532.
2. Lehr, J., Ron, P. (2017) Electrical Breakdown in Solids, Liquid, and Vacuum. Ch. 9 in: Foundation of Pulse Power Technology. New York a. o.: Wiley-Interscience, pp. 439–497.
3. Okada T., Tomita T., Matsuo S., Hashimoto S., Ishida Y., Kiyama S., Takahashi T. (2009) Formation of periodic strain layers associated with nanovoids inside a silicon carbide single crystal induced by femtosecond laser irradiation. J. Appl. Phys., v. 106, p. 054307, 5 p.
4. Okada T., Tomita T., Matsuo S., Hashimoto S., Kashino R., Ito T. (2012) Formation of nanovoids in femtosecond laser irradiated single crystal silicon carbide. Material Science Forum, vol. 725, pp.19–22.
5. Shen, Y. R. (2003) The principles of Nonlinear Optics. New York a. o.: Wiley-Interscience, 563 p.
6. Trokhimchuck, P. P. (2020) Laser-induced optical breakdown of matter: retrospective and perspective./ Advances in Engineering Technology, vol. 4, part 7. New Dehly : AkiNik Publications, pp. 101–132.
7. Trokhimchuck, P.P. (2022) Diffraction: Concepts and Applications. In:Recent Review and Research in Physics. Ed. Jayminkumar Rajanikant Ray, S.S. Sharma, vol. 1, ch. 3. New Dehly : AkiNik Publications, pp. 37–67.
8. Wang H., Zeng Zh. (2012) Electric Breakdown Model for Super-Thin Polyester Foil, ch. 14, pp. 359-376. INTECH, doi: 10.5772/48478, Corpus ID: 34410888.
9. Yablonovich, E. (1971) Optical Dielectric Srength of AlkaliHalide Crystals Obtained by Laserinduced Breakdown. Appl. Phys. Lett., vol.19, is.11, P. 495–497.

УДК 621.315.592

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-14>

Тетяна ЯЦИНЮК

аспірант навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0001-7288-3189

SCOPUS-AUTHOR ID: 57658704300

Андрій КЕВШИН

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0002-3581-8852

SCOPUS-AUTHOR ID: 35422272900

Володимир ГАЛЯН

доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0003-0066-7174

SCOPUS-AUTHOR ID: 35422525700

Інна ІВАЩЕНКО

кандидат хімічних наук, професор кафедри хімії та технологій факультету хімії, екології та фармації, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0001-9724-0737

SCOPUS-AUTHOR ID: 7003831212

Ганна ШАВАРОВА

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій Навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0003-0251-9327

Микола ШЕВЧУК

кандидат хімічних наук, доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету, доцент, вул. Львівська, 75, м. Луцьк, Україна, 43018

ORCID ID: 0000-0001-9471-6314

Костянтин МЕЛЬНИЧУК

студент Навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0001-5666-0698

Дмитро ІВАНЮК

студент Навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0003-0807-2140

Бібліографічний опис статті: Яцинюк, Т., Кевшин, А., Галян, В., Іващенко, І., Шаварова Г., Шевчук, М., Мельничук, К., Іванюк, Д. (2022). Люмінесцентні властивості рідкісноземельних металів в кристалічних та скляних середовищах. *Фізика та освітні технології*, 1, 107–115, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-14>

ЛЮМІНЕСЦЕНТНІ ВЛАСТИВОСТІ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ У СКЛЯНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

У статті проаналізовано особливості випромінювання рідкісноземельних металів (РЗМ) під впливом збуджуючих чинників. Застосовано теорію випромінювальної та безвипромінювальної релаксації в 4f-оболонці іонів РЗМ для встановлення механізму випромінювання. Розглянуто основні процеси, які відбуваються в люмінесцентних центрах. Досліджено та систематизовано чинники, що впливають на люмінесцентні властивості деяких халькогенідних матриць, які леговані іонами РЗМ. Проаналізовано природу фотонів випромінювання, яке залежить від вихідного і кінцевого стану та від механізму збудження. З'ясовано, що для одержання інтенсивного випромінювання в заданому спектральному діапазоні необхідно встановити енергетичне положення основного та збуджених станів активуючих домішок, а також механізм випромінювальної релаксації, внаслідок чого відбувається перехід системи в метастабільний або основний стан.

Експериментальні дані з літературних джерел свідчать про значний вплив дефектів, домішок, неоднорідностей та локального оточення біля рідкісноземельних іонів у склоутворюючій матриці на процеси випромінювання світла в скляних середовищах. Встановлено, що більший час релаксації є результатом зменшення ймовірності безвипромінювальної релаксації внаслідок великої енергетичної відстані між збудженими станами і низької енергії фонів склоутворюючої матриці. Зменшення часу релаксації може відбуватись також внаслідок енергетичного трансферу між іонами РЗМ.

Аналіз проведених досліджень свідчить, що для встановлення механізму фотолюмінесценції (ФЛ) в різних матрицях та для підвищення її ефективності необхідно поєднати моделі випромінювання іонів РЗМ із експериментальними результатами. Інтерпретація експериментальних даних щодо спектрів фотолюмінесценції та оптичного поглинання проведена на основі детального вивчення механізмів випромінюючих переходів у різних халькогенідних матрицях.

Ключові слова: люмінесценція, механізм випромінювання, рідкісноземельні метали, релаксація іонів, халькогенідна матриця.

Tetiana YATSYNIUK

Postgraduate Student, Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0001-7288-3189

SCOPUS-AUTHOR ID: 57658704300

Andriy KEVSHYN

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies of the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0002-3581-8852

SCOPUS-AUTHOR ID: 35422272900

Volodymyr HALYAN

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies of the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0003-0066-7174

SCOPUS-AUTHOR ID: 35422525700

Inna IVASHCHENKO

Candidate of Chemical Sciences, Professor at the Department of Chemistry and Technologies, Faculty of Chemistry, Ecology and Pharmacy, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0001-9724-0737

SCOPUS-AUTHOR ID: 7003831212

Ganna SHAVAROVA

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies of the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0003-0251-9327

Mykola SHEVCHUK

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor at the Department of Materials Science, Lutsk National Technical University, 75 Lvivska Street, Lutsk, 43018, Ukraine

ORCID ID: 0000-0001-9471-6314

Kostiantyn MELNYCHUK

Student of the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0001-5666-0698

Dmytro IVANIUK

Student of the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0003-0807-2140

To cite this article: Yatsyniuk, T., Kevshyn, A., Halyan, V., Shavarova, A., Shevchuk, M., Melnychuk, K., Ivanyuk, D. (2022). Luminestentni vlastyvoli ridkiszozemelnykh metaliv v krystalichnykh ta sklianykh seredovyshchakh [Luminescent properties of rare-earth metals in crystalline and glass environments]. *Physics and Educational Technology*, 1, 107–115, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-14>

LUMINESCENT PROPERTIES OF RARE-EARTH METALS IN GLASS ENVIRONMENTS

The article analyzes the features of radiation of the rare earth metals (REM) under influence of exciting factors. The theory of radiative and non-radiative relaxation in the 4f-shell of REM ions was applied to establish the radiation mechanism. The main processes that take place in luminescent centers are considered. Factors affecting the luminescent properties of some chalcogenide matrices doped REM ions were studied and systematized. The nature of radiation photons, which depends on the initial and final state and on the excitation mechanism, is analyzed. It was found that in order to obtain intense radiation, in a given spectral range, it is necessary to establish the energy position of the ground and excited states of activating impurities, as well as the mechanism of radiative relaxation, as a result of which the system transitions to a metastable or ground state.

Experimental data from literary sources indicate a significant influence of defects, impurities, inhomogeneities and the local environment near rare earth ions in the glass-forming matrix on the processes of light emission in glass media. It was established that the longer relaxation time is the result of a decrease in the probability of nonradiative relaxation due to the large energy distance between excited states and the low energy of phonons of the glassy matrix. A decrease in the relaxation time can also occur as a result of the energy transfer between the REM ions.

The analysis of research shows that in order to establish the mechanism of photoluminescence (PL) in various matrices and to increase its efficiency, it is necessary to combine the models of radiation of REM ions with experimental results. The interpretation of experimental data on photoluminescence and optical absorption spectra is based on a detailed study of the mechanisms radiative transitions in various chalcogenide matrices.

Key words: luminescence, radiation mechanism, rare earth metals, relaxation of ions, chalcogenide matrix.

Вступ

Нетеплове випромінювання речовиною вирізняє процес люмінесценції від випро-

мінювання нагрітих тіл, а також від розсіювання світла та гальмівного випромінювання Вавілова-Черенкова. Люмінесценція з'явля-

ється внаслідок випромінюючих переходів між двома станами атомів або молекул. Природа фотонів випромінювання залежить від вихідного і кінцевого стану та від механізму збудження (Nalyan, 2013; Nalyan, 2019). Отже, для одержання інтенсивного випромінювання у заданому спектральному діапазоні необхідно з'ясувати енергетичне положення основного та збуджених станів активуючих домішок, а також механізм випромінювальної релаксації, внаслідок чого відбувається перехід системи в метастабільний або основний стан. На рис. 1 подано схему енергетичних рівнів в іонах рідкісноземельних металів (РЗМ), через які найчастіше відбувається випромінювання у видимому та ближньому ІЧ діапазонах.

Результати досліджень

Невелика частина атомів сполук (домішок, дефектів) можуть перетворювати поглинуту електромагнітну хвилю у світло видимого або інфрачервоного спектральних діапазонів (Асабина, 2012). До ефективних люмінесцентних середовищ, які знаходять широке застосування в оптоелектронній техніці, відносять халькогенідні стекла та кристали, леговані, як правило, домішками Ho, Tm, Nd, Sm, Eu, Yb, Er.

(Lupan, 2009; Tver'yanovich, 1999; Kang, 2010; Shen, 2010; Wang, 2010). Останній, проявляючи інтенсивне випромінювання з довжиною хвилі 1,54 мкм, найбільше досліджується внаслідок значного поширення оптоволоконних систем зв'язку, які працюють на випромінюванні з такою ж довжиною хвилі і здатні передавати великі масиви захищеної інформації, що створює переваги в порівнянні з радіозв'язком.

У люмінесцентних матеріалах досліджують спектри поглинання, люмінесценції та особливості структури кристалічної / склоподібної матриці активованої РЗМ. Особливу увагу приділяють вивченню кінетики люмінесценції, яка дозволяє отримати інформацію не тільки про енергію початкових і кінцевих станів іонів, але про ймовірність переходів у досліджуваних середовищах.

Серед халькогенідних матеріалів дослідженню спектрів ФЛ у видимій ділянці спектру найбільше уваги приділяють сульфідним напівпровідникам. Це пов'язано з тим, що в сульфідів (у порівнянні з Se- та Te- вмісними матеріалами) край оптичного поглинання найбільше зміщений у короткохвильову сторону. У цих матеріалах збудження ФЛ часто здійс-

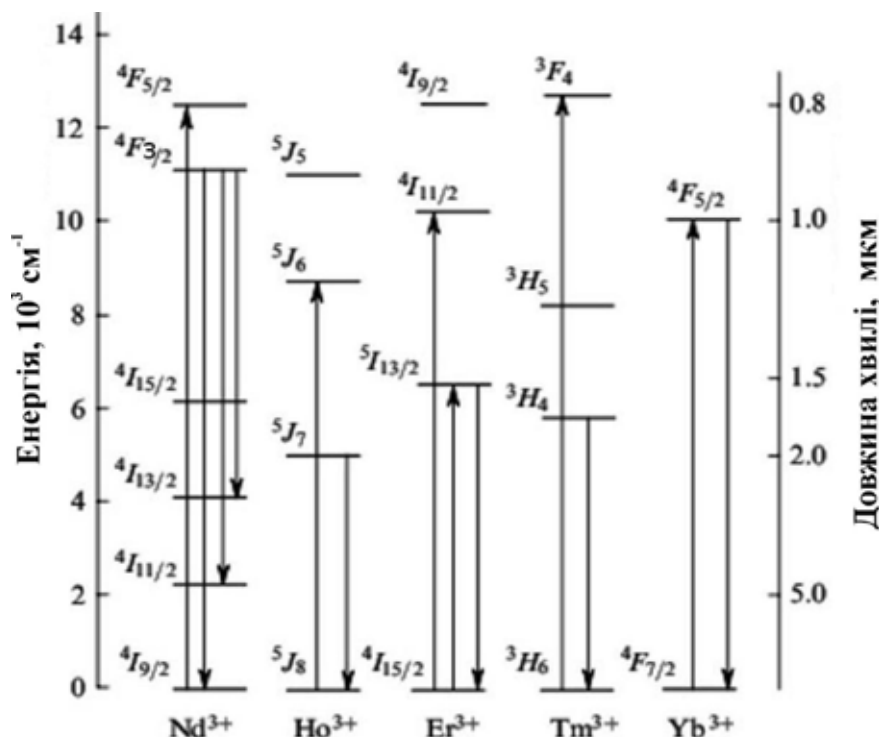


Рис. 1. Структура енергетичних рівнів деяких іонів РЗМ (Курков, 2004).

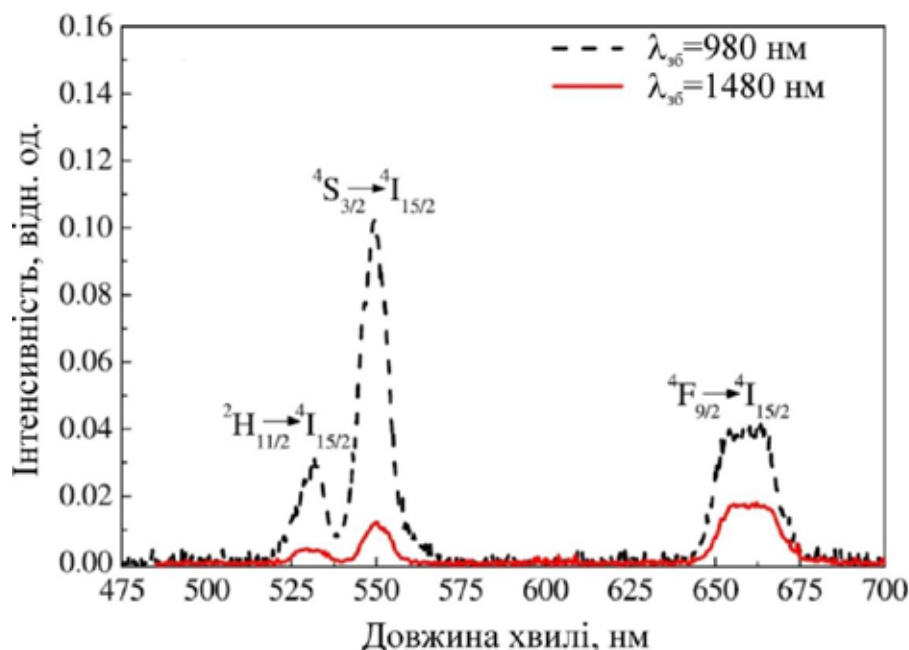


Рис. 2. Спектри ап-конверсійної ФЛ стекел $\text{Ga}_{10}\text{Ge}_{25}\text{S}_{65} : (\text{Er}_2\text{S}_3)_{0,25}$, збуджені випромінюванням з довжиною хвилі 980 та 1480 нм, (Lozano, 2019)

снюють лазерами, в яких максимум випромінювання відповідає резонансним переходам в іонах РЗМ в інфрачервоному спектральному діапазоні. У сульфідних халькогенідах, легованих ербієм (рис. 2), відбувається перетворення (ап-конверсія) інфрачервоного у видиме світло, що знаходить застосування в оптиці цивільного та військового приладобудування.

Основними процесами, які можуть призвести до переходів в іонах Er^{3+} , є поглинання збудженими станами [Nalyan, 2017] (excited state absorption – ESA), кросрелаксація релаксація [Kityk, 2018] (cross-relaxation – CR) та енергетичний трансфер [Nalyan, 2021] (energy transfer – ET) (рис. 3). Збудження склоутворюючої матриці з подальшим ET до іонів Er^{3+} розглядається, як альтернативний шлях виникнення збуджених станів в іонах РЗМ.

Довжина хвилі збуджуючого випромінювання (980 нм) знаходиться в резонансі з переходами $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ і $^4I_{11/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$. Після переходу іонів Er^{3+} в стан $^4F_{7/2}$, відбуваються безвипромінювальні переходи у стани $^2H_{11/2}$ і $^4S_{3/2}$ з виникненням зелених смуг ФЛ через переходи $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ та $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$. Смуга ФЛ в червоній спектральній області (перехід $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$) обумовлена збудженням станів $^4F_{9/2}$ завдяки багатофоновій релаксації зі стану $^4S_{3/2}$, а також

CR (рис. 3) із залученням іонів, які знаходяться у станах $^4I_{9/2}$ та $^4S_{3/2}$ [Lozano, 2019].

Описаний механізм виникнення збуджених станів в іонах Er^{3+} і подальше випромінювання, як видно з рис. 3, містить велику кількість шляхів реалізації, тому не зрозуміло, який із них найбільше ймовірний. Крім того, авторами роботи [Lozano, 2019] не враховано енергію фононів склоутворюючої матриці, що дозволило б встановити, який із шляхів є пріоритетним, а який мало ймовірним. Наприклад, у сульфідних стеклах енергія фононів становить близько 300 – 450 cm^{-1} (Messaddeq, 2001; Nalyan, 2013). Тому багатофоновна релаксація з $^4S_{3/2}$ у стан $^4F_{9/2}$ є мало ймовірною внаслідок великої енергетичної відстані між ними. Для того, щоб визначити пріоритетні шляхи реалізації збуджених станів і встановити єдиний механізм виникнення смуг ФЛ, необхідно було провести комплексні дослідження: проаналізувати спектральний розподіл ФЛ з різним вмістом РЗМ у видимому та близькому ІЧ діапазонах; дослідити кінетику затухання ФЛ для різних смуг ФЛ та вивчити люмінесцентні властивості в різних температурних режимах.

Механізм випромінювальної та безвипромінювальної релаксації як для рекомбінаційної,

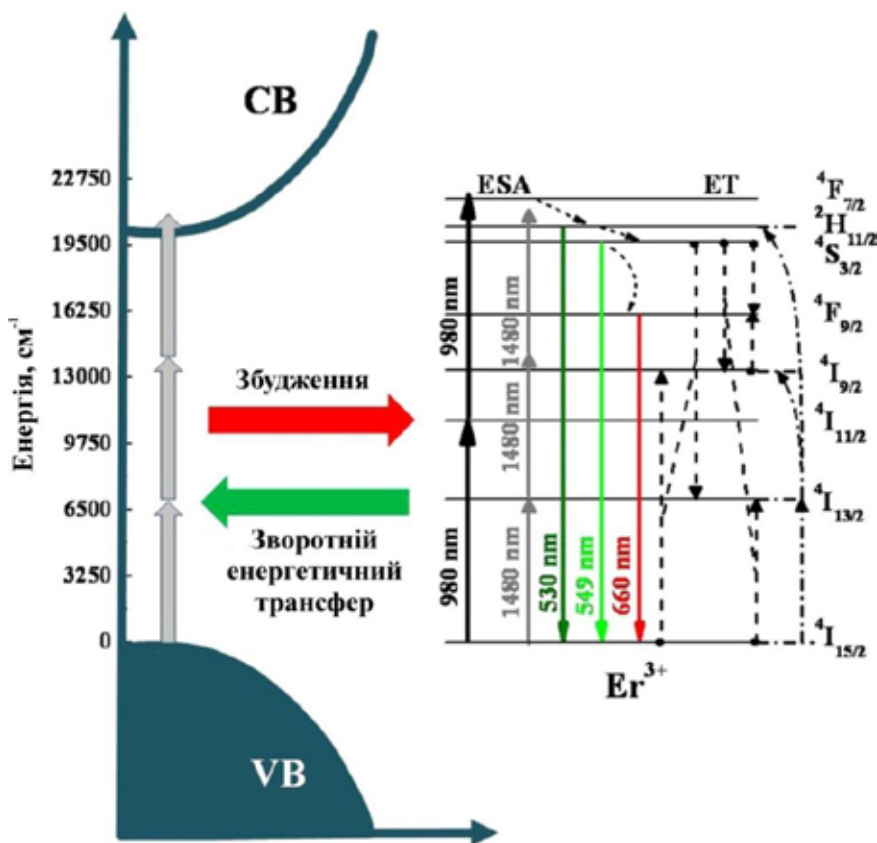


Рис. 3. Схема енергетичних рівнів в іонах Er^{3+} та енергетичних зон (conduction band – CB, valence band – VB) склоутворюючої матриці (Lozano, 2019)

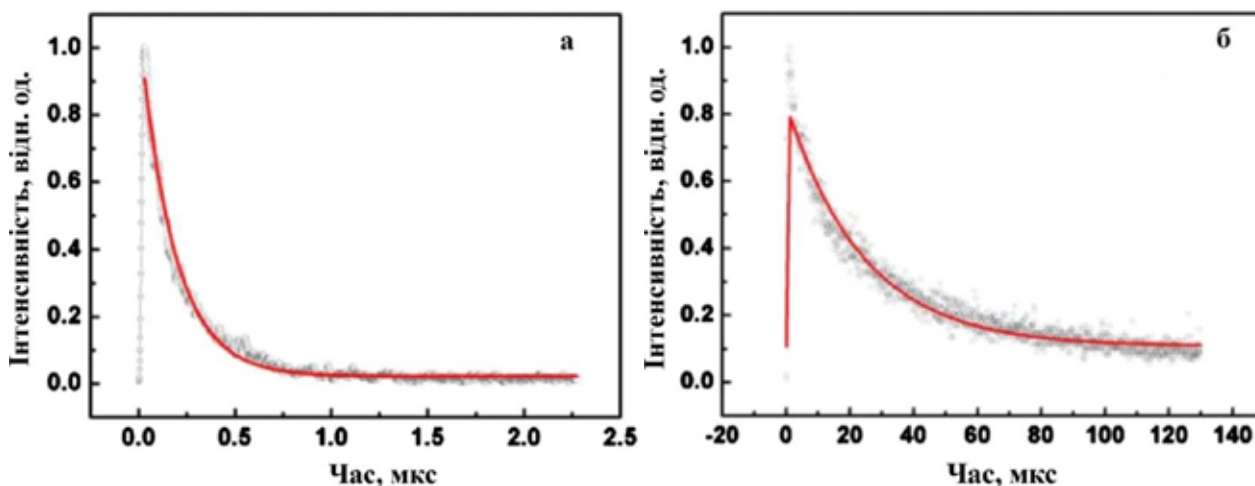


Рис. 4. Часова залежність інтенсивності ФЛ при збудженні випромінюванням з довжиною хвилі 980 нм (точки – експериментальні дані, червона лінія – апроксимація)
 а – ${}^4\text{F}_{7/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$; б – ${}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ (Frej, 2010)

так і для внутрішньоцентрової ФЛ допомагають встановити вимірювання кінетики затухання ФЛ. На рис. 4 подано часову залежність зменшення інтенсивності ФЛ для стекел $\text{Ga}_{10}\text{Ge}_{25}\text{S}_{65}$ легованих ербієм. Час релаксації (τ) залежить

від багатьох чинників, зокрема від станів, між якими відбувається випромінюючий перехід в РЗМ. До прикладу: ${}^4\text{F}_{7/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ (рис. 4 а) $\tau = 67,5$ мкс; ${}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2} - 24,2$ мкс (рис. 4 б) (Frej, 2010).

Безвипромінювальна багатофононна релаксація залежить від енергії фононів. Чим більша енергія фононів, тим ймовірніше відбудеться безвипромінювальна релаксація іонів РЗМ. Тобто зменшення енергії фононів

призводить до збільшення часу життя (τ) та квантової ефективності збудженого рівня і збільшення інтенсивності антистоксової люмінесценції. Оскільки енергія фононів залежить від локального оточення біля рідкісноземельних іонів у склоутворюючій матриці, то останнє має значний вплив на антистоксову люмінесценцію. Отже, більший час релаксації є результатом зменшення ймовірності безвипромінювальної релаксації внаслідок великої енергетичної відстані між цими станами і низької енергії фононів склоутворюючої матриці. Зменшення часу релаксації може відбуватись також внаслідок енергетичного трансферу між іонами РЗМ. Автори роботи (Li, 2016) досліджували ФЛ стеклов системи Ga-Sb-S легованих ербієм і празеодимом.

Релаксація інтенсивності ФЛ з максимумом 1550 нм (рис. 5) аналізувалась при збудженні стеклов випромінюванням з довжиною хвилі 808 нм. Часову залежність інтенсивності ФЛ апроксимовано однією експонентою та визначено час релаксації ($\tau = 2,10$ мс) для зразків легованих Er і Er/Pr де: τ_{Er} і $\tau_{Er/Pr}$ – часи життя збудженого стану ${}^4I_{13/2}$, виміряні при 1550 нм в Er-легованих і Er/Pr-легованих зразках, відповідно. Ефективність η_{ET} становить 71% для Er/Pr-легованих стеклов системи Ga-Sb-S. Цей результат свідчить, що іони Pr^{3+} можуть ефективно використовуватись для зменшення ефективності випромінювання іонів Er^{3+} в стані ${}^4I_{13/2}$. Крім того, зменшення часу життя Er^{3+} в стані ${}^4I_{13/2}$ також вказує на процес ET від Er^{3+} до іонів Pr^{3+} , що знаходяться в стані 3F_4 і 3F_3 (Golding, 2000). Експериментальні результати [Li, 2016] свідчать, що введення Pr^{3+} підвищує інтенсивність інфрачервоної ФЛ при 2740 нм шляхом передачі енергії від іонів Er^{3+} (стан ${}^4I_{13/2}$) до Pr^{3+} (стан ${}^3F_{4,3}$) і одночасно приводить до зменшення інтенсивності ФЛ при 1550 нм.

Ефективність ET між Er^{3+} і Pr^{3+} проаналізовано, використовуючи час релаксації, визначений з експерименту за формулою (Нео, 1997; Tian, 2012):

$$\eta_{ET} = 1 - \frac{\tau_{Er/Pr}}{\tau_{Er}}$$

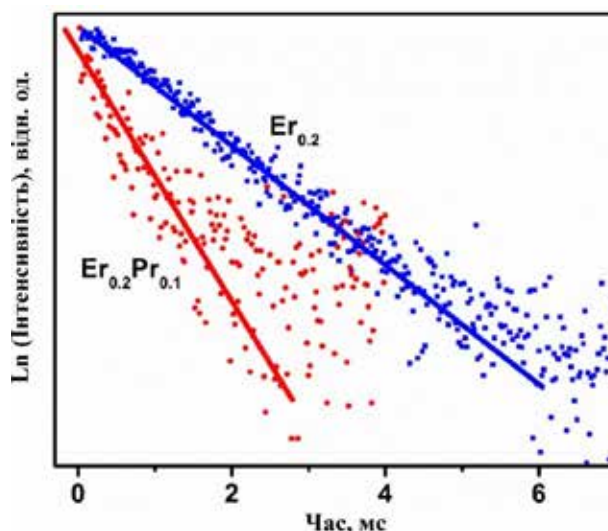


Рис. 5. Часова залежність інтенсивності ФЛ (перехід ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$) стеклов системи Ga-Sb-S, легованих Er та Er/Pr ($\lambda_{36} = 808$ нм) (Li, 2016)

Підвищення інтенсивності ФЛ (2740 нм) в Er/Pr-легованих стеклах є надзвичайно важливим завданням, оскільки випромінювання з цією довжиною хвилі застосовують в медичній галузі при конструюванні «лазерних ножів». Водночас зауважимо, що в статті (Li, 2016) для Er/Pr-легованих стеклов системи Ga-Sb-S не розкрито єдиний механізм виникнення збуджених станів ${}^4I_{11/2}$ і збільшення ймовірності випромінюючих переходів ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ при опроміненні лазером із довжиною хвилі 808 нм (перехід ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$).

Загалом, наукових досліджень щодо особливостей ФЛ в халькогенідних склоподібних сплавах є значно більше у порівнянні з монокристалічними напівпровідниками легованими РЗМ. Це пов'язано з тим, що існує порівняно невелика кількість сполук, в яких можна ввести РЗМ, як основну компоненту. Крім того, варіація складу кристалічної матриці обмежена розчинністю РЗМ, що значно звужує ряд ефективних люмінесцентних матеріалів.

Висновки

Халькогенідні напівпровідники (сполуки з елементами Te, Se, S) є перспективними матеріалами з унікальними властивостями, які широко застосовують у лазерній техніці, оптоелектронних пристроях та телекомунікаціях. Вводячи в склад кристалічних, склоподібних сплавів контрольовані домішки та індукуючи дефекти, можна змінювати локальну структуру

та спектрально-оптичні характеристики твердих тіл.

Застосовуючи теорію випромінювальної та безвипромінювальної релаксації в 4f-оболонці іонів РЗМ, розглянуто основні процеси, які відбуваються в люмінесцентних центрах. Досліджено та систематизовано фактори,

що впливають на люмінесцентні властивості деяких халькогенідних матриць, які леговані іонами РЗМ. Найявні в літературних джерелах експериментальні дані свідчать про значний вплив дефектів, домішок і неоднорідностей на процеси випромінювання світла в напівпровідниках.

ЛІТЕРАТУРА:

- Halyan V.V., Kevshin A.H., Davydyuk G.Ye., Shevchuk N.V. Mechanism of anti-stokes photoluminescence in $\text{Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_2\text{-Er}_2\text{S}_3$ glassy alloys. *Glass Phys. Chem.* 2013. Vol. 39. P. 52–56.
- Halyan V.V., Ivashchenko I.A., Kevshyn A.H., Olekseyuk I.D., Tishchenko P.V., Tretyak A.P. Growth of the $(\text{Ga}_{69.5}\text{La}_{29.5}\text{Er})_2\text{S}_{300}$ Single Crystal and Mechanism of Stokes Emission / *J. Nano- Electron. Phys.* 2019. Vol. 11. P. 01008-1–01008-4.
- Асабина Е.А. Дефекты в твердых телах и их влияние на свойства функциональных материалов. *Нужный-Новгород* : НГУ, 2012. С. 65.
- Lupan E. Emission spectra of $\text{Ge}_{25}\text{Ga}_{1.7}\text{As}_{8.3}\text{S}_{65}$ glass doped with Sm^{3+} and Nd^{3+} . *J Non-Oxide Glass.* 2009. V. 1, No. 3. P. 183–189.
- Tver'yanovich Yu.S., Degtyarev S.V., Pivovarov S.S. [and others]. The environment of Nd^{3+} , Sm^{3+} , Yb^{3+} in chalcogenide glasses containing gallium and germanium / *J. Non Cryst. Solids.* 1999. Vol. 256-257. P. 95–99.
- Zh. Xu, Kang X., Ch. Li [and others] Ln^{3+} ($\text{Ln} = \text{Eu}, \text{Dy}, \text{Sm}, \text{and Er}$) ion-doped YVO_4 nano/microcrystals with multiform morphologies: Hydrothermal synthesis, growing mechanism, and luminescent properties. *Inorg. Chem.* 2010. Vol. 49. № 14. P. 6706–6715.
- Shen X., Nie Q., Xu T., Dai Sh., Wang X. Temperature dependence of upconversion luminescence in erbium-doped tellurite glasses. *J Lumin.* 2010. Vol. 130. P. 1353–1356.
- Wang N. Q., Zhao X., Li C.M. [and others]. Upconversion and color tunability in $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ doped low phonon energy bismuth tellurite glasses. *J. Lumin.* 2010. Vol. 130. P. 1044–1047.
- Курков А.С., Дианов Е.М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности. *Квантовая электроника.* 2004. Т. 34. № 10. С. 881–900.
- Halyan V.V., Kityk I.V., Kevshyn A.H., Ivashchenko I.A., Lakshminarayana G., Shevchuk M.V., Fedorchuk A., Piasecki M. Effect of temperature on the structure and luminescence properties of $\text{Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_2\text{-Er}_2\text{S}_3$ glasses / *J. Lumin.* 2017. Vol. 181. P. 315–320.
- Kityk I.V., Halyan V.V., Yukhymchuk V.O., Strelchuk V.V., Ivashchenko I.A., Zhydachevskii Ya., Suchocki A., Olekseyuk I.D., Kevshyn A.G., Piasecki M. NIR and visible luminescence features of erbium doped $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-La}_2\text{S}_3$ glasses. *J Non Cryst Solids.* 2018. Vol. 498. P. 380–385.
- Halyan V.V., Yukhymchuk V.O., Ivashchenko I.A., Kozak V.S., Tyshchenko P.V., Olekseyuk I.D. Synthesis and downconversion photoluminescence of Erbium-doped chalcogenide glasses of $\text{AgCl(I)-Ga}_2\text{S}_3\text{-La}_2\text{S}_3$ systems. *Applied Optics.* 2021. V. 60. P. 5285–5290.
- Lozano W., Ara C. B., Ledemi Y., Messaddeq Y. Upconversion luminescence in Er^{3+} doped $\text{Ga}_{10}\text{Ge}_{25}\text{S}_{65}$ glass and glass-ceramic excited in the near-infrared / *J. Appl. Phys.* 2013. Vol. 113. P. 083520-1–083520-6.
- Messaddeq S.H., Siu Li M., Lezal D., Raman investigation of structural photoinduced irreversible changes of $\text{Ga}_{10}\text{Ge}_{25}\text{S}_{65}$ chalcogenide glasses / [and others]. *J. Optoelectronics & Adv. Mater.* 2001. Vol. 3. P. 295–302.
- Halyan V.V., Strelchuk V.V., Yukhymchuk V.O. [and others]. Role of structural ordering on optical properties of the glasses $\text{Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_2\text{-Er}_2\text{S}_3$. *Physica B Condens. Matter.* 2013. Vol. 411, № 15. P. 35–39.
- Frej M.L., Valdez E., de Araújo C.B. [and others]. Stokes and anti-Stokes luminescence of Er^{3+} doped $\text{Ga}_{10}\text{Ge}_{25}\text{S}_{65}$ glass excited at 980 and 532 nm. *J. Appl. Phys.* 2010. Vol. 108. P. 093514-1–093514-5.
- Ge Li, Li Lini, Xinyu Huang [and others]. Er^{3+} doped and $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ co-doped gallium-antimony-sulphur chalcogenide glasses for infrared applications. *Opt. Mater. Express.* 2016. Vol. 6. P. 3849–3856.
- J. Heo, W. Y. Cho, W. J. Chung. Sensitizing effect of Tm^{3+} on 2.9 μm emission from Dy^{3+} -doped $\text{Ge}_{25}\text{Ga}_5\text{S}_{70}$ glass / *J. Non Cryst. Solids.* 1997. Vol. 212(s2–3). P. 151–156.
- Tian Y., Xu R., Hu L., Zhang J. 2.7 μm fluorescence radiative dynamics and energy transfer between Er^{3+} and Tm^{3+} ions in fluoride glass under 800 nm and 980 nm excitation. *J Quant Spectrosc Radiat Transf.* 2012. Vol. 113. P. 87–95.
- Golding P. S., Jackson S. D., King T. A., Pollnau M. Energy transfer processes in Er^{3+} -doped and Er^{3+} , Pr^{3+} -codoped ZBLAN glasses. *Phys. Rev. B.* 2000. Vol. 62. P. 856–864.

REFERENCES:

1. Halyan V. V., Kevshin A. H., Davydyuk G. Ye., Shevchuk N. V. Mechanism of anti-stokes photoluminescence in $\text{Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_2\text{-Er}_2\text{S}_3$ glassy alloys. *Glass Phys. Chem.* 2013. Vol. 39. P. 52–56.
2. Halyan V. V., Ivashchenko I. A., Kevshyn A. H., Olekseyuk I. D., Tishchenko P. V., Tretyak A. P. Growth of the $(\text{Ga}_{69.5}\text{La}_{29.5}\text{Er})_2\text{S}_{300}$ Single Crystal and Mechanism of Stokes Emission. *J. Nano- Electron. Phys.* 2019. Vol. 11. P. 01008-1–01008-4.
3. Asabina E.A. Defects in solids and their influence on the properties of functional materials. Nizhny Novgorod: NGU. 2012. p.65.
4. Lupan E. Emission spectra of $\text{Ge}_{25}\text{Ga}_{1.7}\text{As}_{8.3}\text{S}_{65}$ glass doped with Sm^{3+} and Nd^{3+} . *J Non-Oxide Glass.* 2009. V. 1, No. 3. P. 183–189.
5. Tver'yanovich Yu. S., Degtyarev S. V., Pivovarov S. S. [and others]. The environment of Nd^{3+} , Sm^{3+} , Yb^{3+} in chalcogenide glasses containing gallium and germanium. *J. Non Cryst. Solids.* 1999. Vol. 256–257. P. 95–99.
6. Zh. Xu, Kang X., Ch. Li [and others] Ln^{3+} (Ln= Eu, Dy, Sm, and Er) ion-doped YVO_4 nano/microcrystals with multiform morphologies: Hydrothermal synthesis, growing mechanism, and luminescent properties. *Inorg. Chem.* 2010. Vol. 49, № 14. P. 6706–6715.
7. Shen X., Nie Q., Xu T., Dai Sh., Wang X. Temperature dependence of upconversion luminescence in erbium-doped tellurite glasses. *J Lumin.* 2010. Vol. 130. P. 1353–1356.
8. Wang N. Q., Zhao X., Li C.M. [and others]. Upconversion and color tunability in $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ doped low phonon energy bismuth tellurite glasses. *J. Lumin.* 2010. Vol. 130. P. 1044–1047.
9. Kurkov A.S., Dianov E.M. Medium power continuous fiber lasers. *Quantum electronics.* 2004. V. 34, No. 10. pp. 881–900.
10. Halyan V. V., Kityk I. V., Kevshyn A. H. [and others]. Effect of temperature on the structure and luminescence properties of $\text{Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_2\text{-Er}_2\text{S}_3$ glasses. *J. Lumin.* 2017. Vol. 181. P. 315–320.
11. Kityk I. V., Halyan V. V., Yukhymchuk V. O. [and others]. NIR and visible luminescence features of erbium doped $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-La}_2\text{S}_3$ glasses. *J Non Cryst Solids.* 2018. Vol. 498. P. 380–385.
12. Halyan V.V., Yukhymchuk V.O., Ivashchenko I.A. [and others]. Synthesis and downconversion photoluminescence of Erbium-doped chalcogenide glasses of $\text{AgCl(I)-Ga}_2\text{S}_3\text{-La}_2\text{S}_3$ systems. *Applied Optics.* 2021. V. 60, P. 5285–5290.
13. Lozano W., Ara C. B., Ledemi Y., Messaddeq Y. Upconversion luminescence in Er^{3+} doped $\text{Ga}_{10}\text{Ge}_{25}\text{S}_{65}$ glass and glass-ceramic excited in the near-infrared. *J. Appl. Phys.* 2013. Vol. 113. P. 083520-1–083520-6.
14. Messaddeq S. H., Siu Li M., Lezal D. Raman investigation of structural photoinduced irreversible changes of $\text{Ga}_{10}\text{Ge}_{25}\text{S}_{65}$ chalcogenide glasses. *J. Optoelectronics & Adv. Mater.* 2001. Vol. 3. P. 295–302.
15. Halyan V. V., Strelchuk V. V., Yuhymchuk V. O. [and others]. Role of structural ordering on optical properties of the glasses $\text{Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_2\text{-Er}_2\text{S}_3$. *Physica B Condens. Matter.* 2013. Vol. 411, № 15. P. 35–39.
16. Frej M. L., Valdez E., de Araújo C. B. [and others]. Stokes and anti-Stokes luminescence of Er^{3+} doped $\text{Ga}_{10}\text{Ge}_{25}\text{S}_{65}$ glass excited at 980 and 532 nm. *J. Appl. Phys.* 2010. Vol. 108. P. 093514-1–093514-5.
17. Ge Li, Li Lini, Xinyu Huang [and others]. Er^{3+} doped and $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ co-doped gallium-antimony-sulphur chalcogenide glasses for infrared applications. *Opt. Mater. Express.* 2016. Vol. 6. P. 3849–3856.
18. J. Heo, W. Y. Cho, W. J. Chung. Sensitizing effect of Tm^{3+} on 2.9 μm emission from Dy^{3+} -doped $\text{Ge}_{25}\text{Ga}_5\text{S}_{70}$ glass. *J. Non Cryst. Solids.* 1997. Vol. 212(s2–3). P. 151–156.
19. Tian Y., Xu R., Hu L., Zhang J. 2.7 μm fluorescence radiative dynamics and energy transfer between Er^{3+} and Tm^{3+} ions in fluoride glass under 800 nm and 980 nm excitation. *J Quant Spectrosc Radiat Transf.* 2012. Vol. 113. P 87–95.
20. Golding P. S., Jackson S. D., King T. A., Pollnau M. Energy transfer processes in Er^{3+} -doped and Er^{3+} , Pr^{3+} -codoped ZBLAN glasses. *Phys. Rev. B.* 2000. Vol. 62, P. 856–864.

УДК 378.147:37.017

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-15>

Світлана ЯЦЮК

кандидат педагогічних наук, доцент кафедри загальної математики та методики навчання інформатики, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0002-8369-6060

SCOPUS-AUTHOR ID: 57221874892

Валентина ЮНЧИК

старший викладач кафедри загальної математики та методики навчання інформатики, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0003-3500-1508

SCOPUS-AUTHOR ID: 57218347265

Іван СМОЛЮК

доктор педагогічних наук, професор кафедри загальної педагогіки та дошкільної освіти, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0002-8743-0075

Оксана СОБЧУК

кандидат педагогічних наук, доцент кафедри загальної математики та методики навчання інформатики, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0003-2185-9896

Бібліографічний опис статті: Яцюк, С., Юнчик, В., Смолюк, І., Собчук, О. (2022). Академічна доброчесність в контексті освітньої компоненти «Вступ до фаху» для майбутніх вчителів інформатики. *Фізика та освітні технології*, 1, 116–123, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-15>

АКАДЕМІЧНА ДОБРОЧЕСНІСТЬ В КОНТЕКСТІ ОСВІТНЬОГО КОМПОНЕНТУ «ВСТУП ДО ФАХУ» ДЛЯ МАЙБУТНІХ ВЧИТЕЛІВ ІНФОРМАТИКИ

Метою роботи є методичні аспекти формування академічної доброчесності у майбутніх вчителів інформатики під час викладання освітнього компоненту «Вступ до фаху»; досліджено суть поняття академічної доброчесності, наповнення інформаційної бази у відкритому доступі, за допомогою якої здійснюється популяризація принципів академічної доброчесності та підвищення рівня обізнаності всіх учасників освітньо-наукової діяльності у питаннях академічної доброчесності у Волинському національному університеті імені Лесі Українки, зміст академічної доброчесності стосовно формування особистісних та професійних характеристик вчителя інформатики; визначено ставлення до проявів академічної недоброчесності серед майбутніх учителів інформатики. Досліджено сфери академічної культури ЗВО, її елементів та функцій. Розглянуто навички наукової діяльності як складової частини фахової компетентності вчителя інформатики. Висвітлено європейський досвід з формування академічної доброчесності майбутнього вчителя інформатики.

Окреслено ставлення до проявів академічної недоброчесності під час навчання серед майбутніх учителів інформатики та значення співпраці з роботодавцями та стейкхолдерами для розуміння суті того фахівця, якого вони очікують отримати; значення обміну науковими знаннями та ідеями на основі взаємної поваги та усвідомлення відповідальності за результати наукових дій.

У роботі визначено можливості підвищення рівня академічної доброчесності майбутніх учителів інформатики шляхом відповідності чинному законодавству, вироблення доброчесного середовища на факультеті, ЗВО та розвитку особистісного духовного потенціалу учасників освітнього процесу через Кодекс академічної доброчесності ЗВО, «Положення про систему запобігання та виявлення академічного плагіату у науково-дослідній діяльності здобувачів вищої освіти і науково-педагогічних працівників Волинського національного університету імені Лесі Українки», які націлені на сприяння осягненню і прийняттю сенсу академічних чеснот, усвідомленню їх цінності та необхідності, їх реалізації в педагогічній, науковій, навчально-пізнавальній діяльності.

Ключові слова: академічна доброчесність, кодекс академічної доброчесності, морально-етична поведінка, прояви академічної недоброчесності, плагіат, здобувач освіти.

Svitlana YATSIUK

Candidate's of Pedagogical Sciences, Associate Professor at the Department of General Mathematics and Methods of Teaching Computer Science, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0002-8369-6060

SCOPUS-AUTHOR ID: 57221874892

Valentina YUNCHIK

Senior Lecturer at the Department of General Mathematics and Methods of Teaching Computer Science, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0003-3500-1508

SCOPUS-AUTHOR ID: 57218347265

Ivan SMOLYUK

Doctor of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of General Pedagogy and Preschool Education, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0002-8743-0075

Oksana SOBCHUK

Candidate's of Pedagogical Sciences, Associate Professor at the Department of General Mathematics and Methods of Teaching Computer Science, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0003-2185-9896

To cite this article: Yatsyuk, S., Yunchyk, V., Smoliuk, I., Sobchuk, O. (2022). Akademichna dobrochesnist v konstekti osvitnoi komponenty «Vstup do fakhu» dlia maibutnikh vchyteliv informatyky [Academic integrity in the context of the educational component “Introduction to the profession” for future computer science teachers. *Physics and educational technologies*, 1, 116–123, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-15>

ACADEMIC INTEGRITY IN CONTEXT EDUCATIONAL COMPONENTS “INTRODUCTION TO THE PROFESSION” FOR FUTURE IT TEACHERS

In the article the method of forming of academic good works is reflected for the future teachers of informatics during teaching educational a component “Entering into a profession”; investigational essence of concept of academic good works, filling of informative base in the opened access, by which popularization of principles of academic good works and increase of level of knowledge of all participants is carried out educationally scientific to activity in the questions of academic good works in the Volhynia national university of the name of Lesya Ukrainian, maintenance of academic good works in relation to forming of personality and professional descriptions of teacher of informatics; certainly attitude is toward the displays of academic good unworks among the future teachers of informatics. Investigational spheres of academic culture, its elements and functions. Skills of scientific activity are considered as a component professional competence of teacher of informatics. European experience is reflected from forming of academic good works of future teacher of informatics. Outlined attitude toward the displays of academic good unworks during studies among the future teachers of informatics and value of collaboration with employers and steykkholderami for understanding of essence of that specialist which they expect to get; a value of exchange scientific knowledges and ideas is on the basis of mutual respect and awareness of responsibility for the results of scientific actions.

Possibilities of increase of level of academic respectability of future teachers of informatics are certain by accordance to the current legislation, making of respectable environment on a faculty, University and development of personality spiritual potential of participants of educational process through Code of academic respectability, “Position about the system of prevention and exposure of academic plagiarism in research activity of bread-winners of higher education and scientifically-pedagogical workers of the Volyn national university of the name Lesias Ukrainians”, that is aimed at an assistance to understanding and acceptance of sense of academic virtues, realization of their value and necessity, their realization in pedagogical, scientific, educational-cognitive activity.

Key words: *academic respectability; code of academic respectability; mental and ethical behavior; displays of academic unrespectability; plagiarism; bread-winner of education.*

Постановка проблеми. Імідж майбутнього вчителя інформатики формується в закладі вищої освіти (ЗВО), де закладено певні морально-правові відносини. У зв'язку з інтеграцією ЗВО у світовий освітній простір ці відносини набирають ще більшого значення, оскільки цінність полягає саме в якості освіти. Для ЗВО важливо мати свій імідж, де закладено повагу, чесність, довіру, обов'язок та відповідальність. Академічні чесноти є вкрай важливими не лише для майбутнього вчителя інформатики, але й для функціонування і розвитку факультету, університету, суспільства в цілому. Принципи академічної доброчесності відображені також у нормативно-правових документах України.

Підготовка вчителя Нової української школи включає багато важливих аспектів. Вчитель інформатики нового покоління повинен володіти усіма необхідними загальними і фаховими компетентностями для здійснення освітньої діяльності. Освітня програма підготовки таких фахівців у Волинському національному університеті імені Лесі Українки враховує усі вимоги Нової української школи та реального часу (готовність до дистанційного навчання в умовах війни та інших ситуацій, які виникають в країні). Будь-яка освітня діяльність повинна здійснюватись відповідно до норм та принципів академічної доброчесності. В основу принципів академічної доброчесності у Волинському національному університеті імені Лесі Українки покладено *повагу до людської гідності, прав людини та рівність учасників освітнього процесу, чесність, довіру, компетентність, прозорість та інформаційну відкритість, повагу, відповідальність, мужність*. Для майбутнього вчителя інформатики важливо набути, засвоїти та використовувати принципи академічної доброчесності як для здобувача освіти, так і для навчання та виховання учнів загальноосвітніх шкіл. Групою забезпечення в дисципліні «Вступ до фаху» освітньо-професійної програми «Середня освіта. Інформатика» введено модуль «Академічна доброчесність», що дасть можливість реалізувати набуття відповідних професійних компетентностей здобувачів освіти даної освітньої програми.

Аналіз останніх досліджень з проблеми. Останнім часом чимало науковців досліджують питання академічної доброчесності. Ми проаналізували низку кодексів академічної

доброчесності, положень, які прийняті вищими навчальними закладами України і за кордоном. ЗВО широко популяризують принципи академічної доброчесності. На офіційних сторінках можна знайти відповідну інформацію.

Принципи академічної доброчесності закладені у Національній доктрині з розвитку освіти, Стратегії розвитку вищої освіти в Україні на 2022–2032 роки. Міністерством освіти і науки України розроблено «Методичні рекомендації з питань формування внутрішньої системи забезпечення якості освіти у закладах загальної середньої освіти» (наказ МОН № 1460 від 30 листопада 2020 року), Розширений глосарій термінів і понять ст. 42 «Академічна доброчесність» Закону України «Про освіту» (від 5 вересня 2017 р.), 2018), внутрішня система забезпечення якості освіти: Абетка для директора. Служба освітнього омбудсмена спільно з проектом USAID «Взаємодія» розробили безоплатну програму підвищення кваліфікації педагогічних працівників закладів загальної середньої освіти «Рівні можливості в освіті: через прикладні інструменти до запобігання корупції». Розроблено курси та програми для підвищення кваліфікації з питань академічної доброчесності. Зокрема, для вчителів старших класів розроблено онлайн-курс «Академічна доброчесність», серед експертів якого й освітній омбудсмен. У Законі України «Про повну загальну середню освіту» окреслено види відповідальності у випадку порушення академічної доброчесності (частина 7, статті 43).

Значення, суть, поняття академічної доброчесності аналізують такі науковці, як Т. Фініков, Л. Пшенична, В. Юнчик, Л. Засєкіна. Такі науковці, як В. Юнчик, О. Сербін, вважають покращення якості освіти із впровадженням принципів академічної доброчесності. В. Гунчак, А. Мельниченко, І. Єгорченко розробили систему впровадження принципів академічної доброчесності.

Питанням розвитку професійних компетентностей, які формують основу академічної доброчесності майбутніх учителів середньої школи, приділяють увагу такі вчені, як К. Дзеджера, Н. Швадчак, М. Марковська, К. Починок, Я. Понамаренко, О. Палеха, О. Сіненко.

Проблема академічної доброчесності є відносно новою. Але формування академічної доброчесності у вчителів інформатики серед-

ньої школи потребує поглиблення і вдосконалення.

Метою статті є висвітлення методичних аспектів формування академічної доброчесності у майбутніх вчителів інформатики під час викладання освітнього компоненту «Вступ до фаху».

Виклад основного матеріалу. Академічна доброчесність у Волинському національному університеті імені Лесі Українки передбачає дотримання сукупності принципів і правил поведінки кожного учасника університетської спільноти, спрямованих на формування самостійної та відповідальної особистості, спроможної навчатися, викладати і здійснювати наукову діяльність, дотримуючись етичних та правових норм. (Академічна доброчесність: виклики сучасності, 2018; Кодекс академічної доброчесності ВНУ імені Лесі Українки, 2021).

Дотримання академічної доброчесності науково-педагогічними працівниками передбачає (Академічна доброчесність: виклики сучасності, 2018; Кодекс академічної доброчесності ВНУ імені Лесі Українки, 2021):

- посилання на джерела інформації в разі запозичень ідей, тверджень, відомостей;
- дотримання норм законодавства про авторське право;
- контроль за дотриманням цих вимог здобувачами освіти;
- повагу до здобувачів освіти, їхніх батьків, законних представників, незалежно від будь-яких обставин і ознак.

Дотримання академічної доброчесності здобувачами освіти передбачає:

- самостійне виконання навчальних завдань, завдань поточного та підсумкового контролю результатів навчання;
- посилання на джерела інформації в разі запозичень ідей, тверджень, відомостей;
- дотримання норм законодавства про авторське право (Кодекс академічної доброчесності ВНУ імені Лесі Українки 2021; Сацик, 2017; Сорокіна, 2018).

До технологічних рішень, як інструментів протидії порушення академічної доброчесності у Волинському національному університеті імені Лесі Українки, належать (Кодекс академічної доброчесності ВНУ імені Лесі Українки, 2021; закон України «Про авторське право і суміжні права» 2022, ст. 42):

1. Активна участь у проєкті «Ініціатива академічної доброчесності та якості освіти» (Academic Integrity and Quality Initiative), який реалізовуватиметься в ЗВО України за підтримки Посольства США.

2. Створення інформаційної бази у відкритому доступі, за допомогою якої здійснюється популяризація принципів академічної доброчесності та підвищення рівня обізнаності всіх учасників освітньо-наукової діяльності у питаннях академічної доброчесності:

- створення веб-сторінки «Академічна доброчесність» на офіційному сайті Університету, яка постійно оновлюється актуальними інформаційними та методичними матеріалами, присвяченими питанням корпоративної культури на робочому місці та перевагам чесного навчання, інформаційної грамотності, попередженню плагіату та ін.);

- розробка матеріалів, присвячених популяризації принципів академічної доброчесності серед усіх учасників освітнього процесу (банери, інфографіка, роздаткові матеріали тощо).

3. Упровадження в Університеті просвітницьких функцій академічної доброчесності, за допомогою яких стає можливим попередження випадків порушення принципів академічної доброчесності (Фініков, 2016; Кодекс академічної доброчесності ВНУ імені Лесі Українки, 2020; закон України «Про освіту», 2017, ст. 42):

- інформаційно-консультативне супроводження науково-педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти через створення відповідних ресурсів на сайті бібліотеки, друк буклетів, пам'яток, дорожніх карт та постерів, розробка та поширення відео-роликів та інша діяльність з промоції принципів академічної доброчесності та етики академічних взаємовідносин;

- реалізація програми підвищення кваліфікації науково-педагогічних і педагогічних працівників, наприклад, за тематикою «Академічна доброчесність в освіті і науці»;

- лекції основних стейкхолдерів вищої освіти (відомих випускників, роботодавців, експертів тощо) з тематики переваг чесного навчання та реалізації наукових досліджень, цикли тренінгів для всіх учасників освітнього і наукового процесів в рамках всеукраїнських та міжнародних проєктів з академічної доброчесності, грантових програм тощо;

– проведення семінарів зі здобувачами вищої освіти, молодими вченими щодо академічної відповідальності за порушення вимог академічної доброчесності;

– ознайомлення здобувачів вищої освіти й науково-педагогічних працівників із цим Кодексом;

– перевірка випускних кваліфікаційних робіт на предмет академічного плагіату;

– експертна оцінка та (або) технічна перевірка (за допомогою спеціалізованих програмних засобів) щодо ознак академічного плагіату в дослідженнях, підготовлених до захисту тощо;

– інформування здобувачів вищої освіти та молодих вчених про неприпустимість порушення принципів академічної доброчесності та реалізація заходів щодо запобігання проявам академічної недоброчесності за участі Наукового товариства аспірантів і студентів, Ради молодих вчених, провідних фахівців бібліотеки Університету;

– проведення популяризаційних та інформаційно-технологічних заходів (тренінгів, семінарів, відкритих лекцій, навчальних модулів з академічного письма та дотримання принципів академічної доброчесності та етики академічних взаємовідносин тощо);

– моніторинг та опитування щодо випадків порушення академічної доброчесності здобувачами вищої освіти і співробітниками Університету;

– оприлюднення періодичних відкритих звітів щодо рівня дотримання принципів академічної доброчесності та етики академічних взаємовідносин в Університеті;

– проведення наукових досліджень за тематикою академічної доброчесності (Сорокіна, 2017; закон України «Про наукову та науково-технічну діяльність», 2016, ст. 1).

4. Проведення моніторингу реалізації Положення «Про систему запобігання та виявлення академічного плагіату у науково-дослідній діяльності здобувачів вищої освіти і науково-педагогічних працівників Волинського національного університету імені Лесі Українки»; закон України «Про авторське право і суміжні права», 2022, ст.42; положення «Про систему запобігання та виявлення академічного плагіату у науково-дослідній діяльності здобувачів вищої освіти і науково-педагогічних працівни-

ків Волинського національного університету імені Лесі Українки», 2020). Основною метою цього положення є: встановлення базових засад щодо запобігання поширенню академічного плагіату у науково-дослідній діяльності здобувачів вищої освіти та науково-педагогічних працівників; розвиток навичок коректної роботи із джерелами інформації; формування звички до сумлінного дотримання вимог наукової етики та поваги до інтелектуальних надбань; активізація самостійності та індивідуальності при створенні авторського твору; підвищення відповідальності за порушення загальноприйнятих правил цитування з боку викладацького складу, докторантів, аспірантів, здобувачів наукового ступеня, студентів усіх форм навчання (Закон України «Про авторське право і суміжні права», 2022, ст. 42; положення «Про систему запобігання та виявлення академічного плагіату у науково-дослідній діяльності здобувачів вищої освіти і науково-педагогічних працівників Волинського національного університету імені Лесі Українки», 2020).

В освітньому компоненті «Вступ до фаху» для забезпечення загальних та фахових компетентностей та формування м'яких навичок у майбутніх вчителів інформатики введено модуль «Академічна доброчесність». Починаючи навчання у закладі вищої освіти (ЗВО), здобувачі освіти повинні чітко розуміти свої права і обов'язки. Тому розпочати вивчення модуля «Академічна доброчесність» рекомендуємо саме з ознайомлення здобувачів освіти з Правилами розпорядку, Статутом та Кодексом академічної доброчесності ЗВО. Усі документи, що стосуються навчального процесу, розміщено на офіційній сторінці ЗВО у відкритому доступі. Здобувачам освіти пропонується курс лекційних та практичних занять для досягнення таких компетентностей (Освітньо-професійна програма «Середня освіта. Інформатика» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти Волинського національного університету імені Лесі Українки, 2021, ст. 5-18):

1. Здатність діяти відповідально і свідомо на засадах поваги до прав і свобод людини та громадянина; реалізувати свої права і обов'язки.

2. Здатність знаходити, обробляти інформацію з різних джерел, аналізувати та синтезувати на основі перевірених фактів та логічних аргументів.

3. Здатність до самовизначення мети діяльності, самостійного пошуку знань, їх осмислення, закріплення, формування та розвитку умінь і навичок.

4. Здатність орієнтуватися в інформаційному просторі, здійснювати пошук і критично оцінювати інформацію, оперувати нею у професійній діяльності.

5. Використовувати знання та розуміння міжнародних та національних стандартів і практик в професійній діяльності.

6. Розробляти та підбирати навчальне, інформаційно-методичне й технічне забезпечення із використання різних освітніх та комунікаційних платформ.

Невід'ємною складовою частиною академічної доброчесності є академічна культура, яку необхідно сформувати у здобувачів освіти на початкових стадіях навчання в ЗВО. Це робить робить свій відбиток на рівень розвитку ЗВО. Слід звернути увагу на сфери академічної культури ЗВО:

1) відношення науково-педагогічних працівників та здобувачів освіти до навколишнього природного і соціального середовища;

2) відношення науково-педагогічних працівників та здобувачів освіти між собою;

3) відношення науково-педагогічних працівників та здобувачів з самими собою, тобто їх самопізнання, самовиховання і саморозвиток.

Розглядати і навчати академічній культурі здобувачів освіти не можна у відриві від соціального життя сфери вищої освіти, інтересів членів університетської спільноти. Слід звернути увагу на основні елементи академічної культури, якими керуються члени академічної спільноти під час освітньої діяльності: поняття, відносини та цінності. Потрібно врахувати, що академічна культура впливає на соціальне життя університетської спільноти, її ціннісні основи, стиль роботи та зразки поведінки. Важливо вказати на функції академічної культури. Вчені по-різному їх трактують. Але серед основних можна виділити пізнавальну, світоглядну, комунікативну, виховну та інші функції.

У ЗВО здобувачам освіти прикріплюють навички наукової діяльності як складової частини фахової компетентності вчителя. Тому в модулі «Академічна доброчесність» не менш важливо розвивати у здобувачів освіти навички коректної роботи із джерелами інформації, самостійність при створенні публікацій; використання загальноприйнятих правил цитування авторських статей чи публікацій, поняття плагіату, порушення авторського права та крадіжки інтелектуальної власності. Оскільки курсова робота є першою науковою роботою здобувачів освіти, то в модулі «Академічна доброчесність» варто ознайомити здобувачів з основними вимогами до написання курсових робіт та «Положенням про систему запобігання та виявлення академічного плагіату у науково-дослідній діяльності здобувачів вищої освіти і науково-педагогічних працівників і здобувачів освіти Волинського національного університету імені Лесі Українки» (Закон України «Про наукову та науково-технічну діяльність» 2016; положення «Про систему запобігання та виявлення академічного плагіату у науково-дослідній діяльності здобувачів вищої освіти і науково-педагогічних працівників Волинського національного університету імені Лесі Українки», 2020).

Висновки і перспективи подальших розвідок. Результативність, поглиблена професійна підготовка майбутніх вчителів інформатики, готовність їх до роботи в закладах середньої освіти забезпечуватиметься в результаті набуття здобувачами освіти програмних компетентностей, які зазначено в освітньо-професійній програмі «Середня освіта. Інформатика». Для вчителя інформатики важливо сформувати і утвердити принципи академічної доброчесності. Це дасть можливість розроблення дієвих механізмів їх реалізації у практиці викладання й учіння в закладі середньої освіти.

У перспективі вбачаємо поглиблений аналіз питань академічної доброчесності здобувачів освіти освітньо-професійної програми «Середня освіта. Інформатика» для розвитку конкурентоспроможності випускників програми та ЗВО.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Сацик В. Академічна доброчесність: міфічна концепція чи дієвий інструмент забезпечення якості вищої освіти? URL: <http://education-ua.org/ua/articles/930-akademichna-dobrocheshnist-mifichna-kontseptsiya-chi-dievij-instrument-zabezpechennya-yakosti-vishchoji-osviti>.

2. Академічна доброчесність: проблеми дотримання та пріоритети поширення серед молодих вчених / Сорокіна Н. Г. та ін. Дніпро : ДРІДУ НАДУ, 2017. 169 с.
3. Фініков Т.В. Академічна чесність як основа сталого розвитку університету. Міжнарод. благод. фонд «Міжнарод. фонд. дослідж. освіт. політики». Київ : Таксон, 2016. 234 с.
4. Академічна доброчесність: виклики сучасності. Збірник наукових есе учасників наукового стажування для освітян (Республіка Польща, Варшава, 1 – 13.10.2018). Варшава, 2018. 162 с.
5. Рекомендації до побудови внутрішньої системи забезпечення якості освіти у закладі загальної середньої освіти / Бобровський М.В. та ін. Київ : Державна служба якості освіти, 2019. 240 с.
6. Закон України «Про освіту»: станом на 22 вересня 2017 р. *Верховна Рада України*. Офіц. вид. Київ : Парлам. вид-во, 2017. 122 с.
7. Закон України «Про авторське право і суміжні права». URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/3792-12/page3>.
8. Закон України «Про наукову та науково-технічну діяльність». Стаття 1 «Основні терміни та їх визначення». URL: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/848-19>.
9. Закон України «Про Освіту». Стаття 42 «Академічна доброчесність». URL: http://kodeksy.com.ua/pro_osvitu/statja-42.htm.
10. Кодекс академічної доброчесності ВНУ імені Лесі Українки. URL: https://ra.vnu.edu.ua/akademichna_dobrochesnist/kodeks_akademichnoi_dobrochesnosti/, 2020.
11. Національна доктрина з розвитку освіти. URL: https://pidru4niki.com/15970122/pedagogika/natsionalna_doktrina_rozvitku_osviti_vityag.
12. Освітньо-професійна програма «Середня освіта. Інформатика» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти Волинського національного університету імені Лесі Українки, 2021. 23 с.
13. Положення «Про систему запобігання та виявлення академічного плагіату у науково-дослідній діяльності здобувачів вищої освіти і науково-педагогічних працівників Волинського національного університету імені Лесі Українки».
14. Проект сприяння академічній доброчесності в Україні (SAIUP) // SAIUP. URL: <http://www.americancouncils.org.ua>.
15. Стратегія розвитку вищої освіти в Україні на 2022–2032 роки. <https://mon.gov.ua/ua/news/opublikovano-strategiyu-rozvitku-vishoyi-osviti-v-ukrayini-na-2022-2032-roki>.

REFERENCES:

1. Satsyk V. Academic integrity: a mythical concept or an effective tool for ensuring the quality of higher education? URL: <http://education-ua.org/ua/articles/930-akademichna-dobrochesnist-mifichna-kontseptsiya-chi-dievij-instrument-zabezpechennya-yakosti-vishchoji-osviti> [in Ukrainian].
2. Academic integrity: problems of compliance and priorities of dissemination among young scientists / N. G. Sorokina and others. Dnipro: DRIDU NADU, 2017. 169 p. [in Ukrainian].
3. Finikov T.V. Academic honesty as the basis of sustainable development of the university. International grace fund "International. stock. research education politicians". Kyiv: Takson, 2016. 234 p. [in Ukrainian].
4. Academic integrity: modern challenges. A collection of scientific essays by participants in a scientific internship for educators (Republic of Poland, Warsaw, October 1 – 13, 2018). Warsaw, 2018. 162 p. [in Ukrainian].
5. Recommendations for building an internal system for ensuring the quality of education in a general secondary education institution / Bobrovsky M.V. etc. Kyiv: State Service of Education Quality, 2019. 240 p. [in Ukrainian].
6. Law of Ukraine "On Education": as of September 22, 2017, the Verkhovna Rada of Ukraine. officer view. Kyiv: Parlam. edition, 2017. 122 p. [in Ukrainian].
7. Law of Ukraine "On copyright and related rights". URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/3792-12/page3>. [in Ukrainian].
8. Law of Ukraine "On scientific and scientific and technical activity". Article 1 "Basic terms and their definitions". URL: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/848-19>. [in Ukrainian].
9. Law of Ukraine "On Education". Article 42 "Academic integrity". URL: http://kodeksy.com.ua/pro_osvitu/statja-42.htm. [in Ukrainian].
10. Code of Academic Integrity of Lesya Ukrainka University. URL: https://ra.vnu.edu.ua/akademichna_dobrochesnist/kodeks_akademichnoi_dobrochesnosti/, 2020 [in Ukrainian].
11. National doctrine on the development of education. URL: https://pidru4niki.com/15970122/pedagogika/natsionalna_doktrina_rozvitku_osviti_vityag [in Ukrainian].
12. Educational and professional program "Secondary education. Informatics" of the first (bachelor's) level of higher education of Volyn National University named after Lesya Ukrainka, 2021. 23 p. [in Ukrainian].

13. Regulation "On the system of prevention and detection of academic plagiarism in research activities of higher education applicants and scientific and pedagogical workers of Volyn National University named after Lesya Ukrainka" [in Ukrainian].

14. The Project of Promotion of Academic Integrity in Ukraine (SAIUP) // SAIUP. URL: <http://www.americancouncils.org.ua>. [in Ukrainian].

15. Strategy for the development of higher education in Ukraine for 2022–2032. <https://mon.gov.ua/ua/news/opublikovano-strategiyu-rozvitku-vishoyi-osviti-v-ukrayini-na-2022-2032-roki> [in Ukrainian].

УДК 538.9

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-16>**Людмила СОЛЯНИК**

кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник, Інститут колоїдної хімії та хімії води імені А.В. Думанського Національної академії наук України, Вернадського Академіка бул, 42, м. Київ, Україна, 03142

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2661-9392>**SCOPUS-AUTHOR ID:** 36903008700

Бібліографічний опис статті: Соляник, Л. (2022). Аналіз застосування теорії догонадзе-кузнєцова-левича при дослідженні елементарного акту red|ox процесу на міжфазній межі тверде тіло-електроліт. *Фізика та освітні технології*, 1, 124–131, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-16>

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ДОГОНАДЗЕ-КУЗНЄЦОВА-ЛЕВИЧА ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ЕЛЕМЕНТАРНОГО АКТУ RED|OX ПРОЦЕСУ НА МІЖФАЗНІЙ МЕЖІ ТВЕРДЕ ТІЛО-ЕЛЕКТРОЛІТ

Метою даної роботи було узагальнення теорії Догондзе-Кузнєцова-Левича для розрахунку окислювально-відновлювальних процесів на міжфазній межі діелектрик-електроліт та, на основі проведених розрахунків, обґрунтувати можливість виникнення поверхневої провідності діелектрика у сольових розтопах.

Показано, що перехід поверхневого шару діелектрика в провідний стан полягає у виникненні перерозподілу електронної густини між адсорбентом і адсорбатом, що приводить до відповідних змін величини енергії Фермі електронів поверхні електроду так і енергії граничних молекулярних орбіталей ЕАК. Домінантою цього ефекту є вирівнювання рівнів енергії Фермі матеріалу катода й енергії НВМО ЕАК. Встановлено, що для того, щоб окислювально-відновний процес на твердому тілі проходив активно необхідно, щоб рівень Фермі був розташований усередині зони провідності або валентної зони, причому занурення рівня Фермі на відстань рівну чи більшу, ніж $4kT$ в зону приводить до того, що поверхня твердого тіла проявляє електрохімічну функцію аналогічно металу (металізується), при цьому ширина забороненої зони може бути великою. Виявлено, що змінити положення рівня Фермі щодо країв зони провідності й валентної зони можна зовнішнім електричним полем, направленим перпендикулярно поверхні твердого тіла чи поляризуючою дією молекули або іона, адсорбованого на поверхні твердого тіла. Зовнішнє електричне поле приводить до нахилу енергетичних рівнів у твердому тілі, внаслідок цього виникає поверхневий потенціал, тобто загин зон на поверхні. Знак зовнішнього електричного поля визначає напрямок вигину енергетичних зон. При цьому, якщо тверде тіло використовується як катод, тобто до твердого тіла прикладена катодна перенапруга, то зони вигинаються вниз, що приводить до наближення рівня Фермі до нижнього краю зони провідності й одночасному віддаленню від верхньої межі валентної зони. Відповідно при анодній перенапрузі ситуація змінюється на протилежну. Зовнішнє електричне поле не змінює ширину забороненої зони й положення рівня Фермі. Катодна перенапруга, прикладена до поверхні, приводить до наближення рівня Фермі до краю зони провідності на поверхні кристала, але не змінює ширину забороненої зони (приблизно 5,5 eV). При високих катодних перенапругах рівень Фермі може наблизитися до мінімуму зони провідності, що приведе до виродження електронного газу, а саме тверде тіло (діелектрик) почне проявляти електрохімічну функцію аналогічно металу. Неоднорідність електричного поля приводить до того, що енергетичні рівні на поверхні твердого тіла вигинаються по-різному, що приводить до зміни ширини забороненої зони й відстані від рівня Фермі до межі зони провідності або валентної зони. При цьому характер поляризації поверхні залежить як від адсорбованого іона, так і від самого твердого тіла. Таким чином, один і той же іон може по-різному поляризувати поверхню твердого тіла.

Ключові слова: Квантово-механічна теорія елементарного акту переносу заряду, електрод, діелектрик, напівпровідник.

Ludmila SOLYANIK

PhD in Chemistry, Senior Researcher, A.V. Dumansky Institute of Colloid and Water Chemistry, 42 Vernadsky Academician Avenue, Kyiv, 03142, Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2661-9392>,**SCOPUS-AUTHOR ID:** 36903008700

To cite this article: Solyanik, L. (2022). Analiz zastosuvannia teorii dohonadze-kuznietsova-levycha pry doslidzhenni elementarnoho aktu red|ox protsesu na mizhfaznii mezhi tverde tilo-elektrolit [Analysis of the application of the doghonadze-kuznetsova-levych theory in the study of the elementary act of

the red|ox process at the solid-electrolyte interphase boundary]. *Physics and Educational Technology*, 1, 124–131, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-16>

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF THE DOGHONADZE-KUZNETSOVA-LEVYCH THEORY IN THE STUDY OF THE ELEMENTARY ACT OF THE RED|OX PROCESS AT THE SOLID-ELECTROLYTE INTERPHASE BOUNDARY

The purpose of this work was to generalize the Dogonadze-Kuznetsov-Levich theory for the calculation of oxidation-reduction processes at the dielectric-electrolyte interface and, based on the calculations, to substantiate the possibility of the surface conductivity of the dielectric in salt melts.

It is shown that the transition of the surface layer of the dielectric to the conductive state consists in the redistribution of the electron density between the adsorbent and the adsorbate, which leads to corresponding changes in the Fermi energy of the surface electrons of the electrode and the energies of the marginal molecular orbitals of the EAC. The dominant effect of this effect is the equalization of the Fermi energy levels of the cathode material and the energies of the HVMO EAC. It was established that in order for the redox process on a solid to take place actively, it is necessary for the Fermi level to be located inside the conduction band or the valence band, and the immersion of the Fermi level by a distance equal to or greater than $4kT$ into the band leads to the fact that the surface of a solid body exhibits an electrochemical function similar to that of a metal (metallizes), while the band gap can be large. It was found that the position of the Fermi level relative to the edges of the conduction band and valence band can be changed by an external electric field directed perpendicular to the surface of a solid body or by the polarizing action of a molecule or ion adsorbed on the surface of a solid body. An external electric field leads to a tilt of energy levels in a solid body, as a result of which a surface potential arises, that is, a bending of zones on the surface. The sign of the external electric field determines the direction of bending of energy zones. At the same time, if a solid body is used as a cathode, that is, a cathodic overvoltage is applied to the solid body, then the zones bend downward, which leads to the Fermi level approaching the lower edge of the conduction band and simultaneously moving away from the upper border of the valence band. Accordingly, with anodic overvoltage, the situation changes to the opposite. The external electric field does not change the width of the band gap and the position of the Fermi level. Cathodic overvoltage applied to the surface brings the Fermi level closer to the edge of the conduction band on the crystal surface, but does not change the band gap (about 5.5 eV). At high cathodic overvoltages, the Fermi level can approach the minimum of the conduction zone, which will lead to the degeneration of the electron gas, and the solid body (dielectric) will begin to exhibit an electrochemical function similar to that of a metal. The heterogeneity of the electric field leads to the fact that the energy levels on the surface of the solid body are bent differently, which leads to a change in the width of the band gap and the distance from the Fermi level to the border of the conduction band or valence band. At the same time, the nature of the surface polarization depends on both the adsorbed ion and the solid body itself. Thus, the same ion can polarize the surface of a solid in different ways.

Key words. *Quantum-mechanic theory elementary act of transfer charge, electrode, dielectric, semiconductor.*

1. Актуальність проблеми. Теорія елементарного акту реакції електронного переносу бере свій початок із класичних праць Маркуса, згідно яких, природа енергії активації переносу заряду полягає в необхідності витрати енергії системи на часткову реорганізацію середовища та ядерної конфігурації реагентів у процесі переносу електрона в полярних розчинах. Однак Маркусу не вдалося порахувати передекспоненційний множник у константі швидкості реакції. Тому залишалося незрозумілим якою мірою динамічні властивості розчинника впливають на швидкість елементарного акту реакції переносу електрона. Перший розрахунок передекспоненти було зроблено в роботах Левича, Догонадзе, Кузнєцова методом квантово-механічної теорії збурень, в рамках якої константа швидкості реакції прямо пропорційна до квадрату резонансного інтеграла, що характеризує ступінь перекривання орбіталей донора

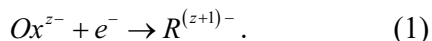
і акцептора. У рамках цієї теорії динамічні властивості розчинника не мають істотного впливу на швидкість реакції. Однак, при оцінці характеристик і параметрів процесу переносу заряду на міжфазній границі електрод–розтоп, дана теорія не може дати повну та всебічну інформацію кінетичні особливості електрохімічної поведінки частинок на міжфазній межі.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Квантово-механічна теорія елементарного акту окислювально-відновного процесу, наприклад, (Ponseca, 2017; Wu, 2016; Adams, 2003) інтенсивно вивчається в літературі (Adams, 2003; Zhu, 2016; Ihly, 2016; Hong, 2014; Tisdale, 2010; Robel, 2007; Harris, 2016). Перенос електрона був представлений ними, як квантовий перехід між двома поверхнями потенціальної енергії з певними електронними станами. В роботах (Marcus, 1956; Marcus, 1985) розкриті теорії адиабатичних і неадиабатичних електронних

переходів, виявлена роль атомних і електронних коливань та височастотних флуктуацій при поляризації розчинника, в (Miller, 1984; Closs, 1986; Closs, 1988; Han, 2021; Atxabal, 2019; Yuan, 2018; Parada, 2019; Scholes, 2007; Tarafder, 2014) досліджені електродні реакції різної природи на межі метал/електроліт. Разом з тим, окислювально-відновні реакції на межі неметалевий електрод/електроліт були досліджені в низці робіт, наприклад в (Tvrdu, K., 2011; Zhu, 2014; Olshansky, 2015). Однак стосовно до red|ox процесів на межі неметалевий електрод/електроліт питання залишається відкритим. Тому доцільно вивчити можливість застосування теорії Догондзе-Кузнецова-Левича, стосовно до red|ox процесів на межі неметалевий електрод/електроліт та можливість її застосування до розрахунків струмів обміну електрохімічних реакцій.

Тому метою даної роботи було узагальнення теорії Догондзе-Кузнецова-Левича для розрахунку окислювально-відновлювальних процесів на міжфазній межі діелектрик-електроліт та, на основі проведених розрахунків, обґрунтувати можливість виникнення поверхневої провідності діелектрика у сольових розтопах.

3. Основні результати. Для конкретності, розглянемо елементарний акт відновного процесу на межі тверде тіло/електроліт:



Припустимо, що електрон переходить з інтервалу енергетичних рівнів $E - (E + dE)$ електрода на реагент, що перебуває на відстані $x - (x + dx)$ від електрода. Густина струму такого процесу буде визначатися наступним виразом [13]:

$$j(E, x) = e[c] \frac{\omega_{eff}}{2\pi} \kappa(x) f(E) g(E) \exp\left(-\frac{(\Delta G(E, x) + E_r)^2}{4kT \cdot E_r}\right) dE dx \quad (2)$$

Тут $[c]$ – концентрація реагуючих іонів на відстані x від електрода, $f(E)$ – функція розподілу Фермі електронів по енергіях, $g(E)$ – густина квантових рівнів в електроді, $\kappa(x)$ – трансмісійний коефіцієнт, що визначає ступінь адиабатичності процесу переносу електрона, ω_{eff} – ефективна частота флуктуації всіх класичних ступенів вільності, E_r – загальна енергія реорганізації, $\Delta G(E, x)$ – енергія Гібса реакції.

Надалі обмежимося розглядом області нормального розряду, коли вільна енергія Гібса

менша від енергії реорганізації: $|\Delta G| < E_r$. Інтервал ΔG реакцій, при яких $|\Delta G| \geq E_r$, відповідає областям безбар'єрного й безактиваційного розрядів.

Для неметалевого електрода перенос електрона може відбуватися як із зони провідності, так і з валентної зони. Відповідно до цього, струм $j(E, x)$ розділяється на дві складові $j_p(E, x)$ та $j_v(E, x)$. Записавши в явному вигляді $\Delta G(E, x)$, струми через зону провідності й валентну зону матимуть такий вигляд:

$$j_p(E, x) = e[c] \frac{\omega_{eff}}{2\pi} \kappa(x) g(E) \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\Delta_p + E}{kT}\right)} \times \exp\left(-\frac{(E_r + \chi - I + W_R - W_o - E)^2}{4kT \cdot E_r}\right) dE dx \quad (3)$$

$$j_v(E, x) = e[c] \frac{\omega_{eff}}{2\pi} \kappa(x) g(E) \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{\Delta_v + E}{kT}\right)} \times \exp\left(-\frac{(E_r + \chi - I + E_g + W_R - W_o + E)^2}{4kT \cdot E_r}\right) dE dx \quad (4)$$

У цих формулах χ – енергія електронної спорідненості електрода, I – енергія іонізації реагента в газовій фазі, $g(E)$ – густина квантових рівнів в електроді, E_g – ширина забороненої зони електрода, Δ_p (Δ_v) – відстань від рівня Фермі до мінімуму зони провідності, W – енергія реагента поблизу поверхні електрода, E – енергія електрона.

З формул (3–4) видно, що густина мікроскопічного струму є складною функцією багатьох параметрів, які, крім того, ще й взаємозалежні між собою. Тому прямий аналіз цих співвідношень ускладнений.

Проведемо якісний аналіз залежності густини струму через зону провідності від енергії E перенесеного електрона й відстані Δ_p від рівня Фермі до мінімуму зони. Для аналізу необхідно знати густину квантових рівнів $g(E)$. Залежно від обраної моделі мінімуму зони провідності, $g(E)$ буде мати різний вигляд. В роботі представлено найпростіший випадок, коли $g(E) \sim \sqrt{E}$. Якісний графік залежності густини струму $j_p(E, x)$ від енергії E перенесеного електрона й відстані рівня Фермі до мінімуму зони провідності наведено на рис. 1.

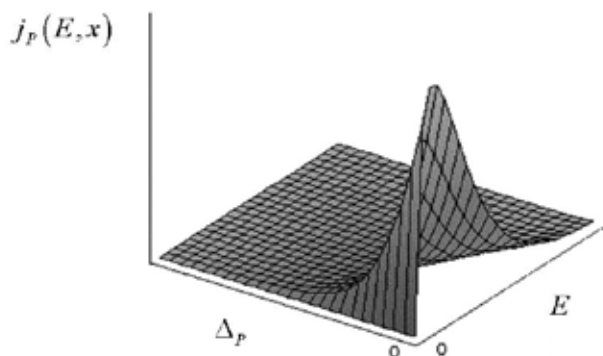


Рис. 1. Графік залежності мікроскопічної густини струму через зону провідності від енергії електрона і відстані рівня Фермі до мінімуму зони провідності

Із цього графіка можна зробити такі висновки:

- переважний перенос електронів відбувається з енергетичних рівнів, розташованих поблизу мінімуму зони провідності;
- мікроскопічна густина струму різко збуває зі зростанням відстані рівня Фермі до мінімуму зони провідності. При великій відстані ($\Delta_p \gg kT$) струм асимптотично прагне до нуля, внаслідок чого відновний процес на такому електроді йти не буде.

На рис. 2. зображений графік залежності густини струму через валентну зону при постійній ширині забороненої зони. Із цього малюнка видно, що:

- як й у випадку зони провідності, основний внесок у струм вносять електрони, розташовані у валентній зоні, поблизу забороненої;
- густина струму слабо залежить від відстані рівня Фермі до валентної зони.

Ці висновки можна легко пояснити, взявши до уваги різний характер поведінки розподілу Фермі $f(E)$ для зони провідності й валентної зони: розподіл Фермі різко збуває, наближаючись до нуля для значень енергій $E > E_F$; у випадку ж валентної зони, коли $E < E_F$, розподіл Фермі наближається до одиниці. Дуже важливою обставиною є те, що у виразі для густини струму через валентну зону використовується величина ширини забороненої зони. Для електрода із широкою забороненою зоною (широкозонний напівпровідник або діелектрик) густина струму через валентну зону на багато порядків менша від густини струму через зону провідності. Це означає, що для

таких електродів відновний процес може протікати тільки через зону провідності, коли рівень Фермі розташований близько до мінімуму зони провідності.

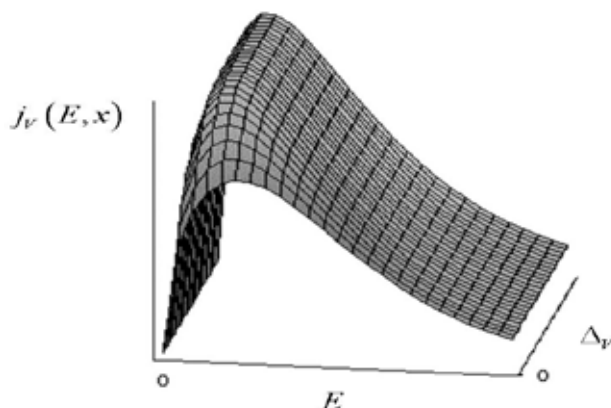


Рис. 2. Графік залежності мікроскопічної густини струму через валентну зону від енергії електрона і відстані рівня Фермі до валентної зони при сталій ширині забороненої зони

Формули (5.7-5.8) дають можливість провести точний чисельний розрахунок густини струму на межі "неметалевий електрод/ електродіт". Для цього треба знати ряд параметрів: величини внутрішньо і зовнішньосферної енергій реорганізації, трансмісійний коефіцієнт, енергію іона поблизу електрода тощо. У достатньому наближенні для розрахунку цих величин необхідно враховувати реальну будову реагентів. Ефект реальної будови проявляється в першу чергу залежно від орієнтації реагента та електрода. Для врахування такого роду ефектів необхідно залучати методи квантової хімії, у першу чергу для розрахунку геометрії й зарядового розподілу в молекулах реагентів.

В експериментальних умовах для розрахунку повної густини струму необхідно враховувати участь всіх електронних рівнів твердого тіла та реагентів, розташованих на всіх відстанях:

$$j = e \frac{\omega_{eff}}{2\pi} \int_{x_{max}}^{+\infty} [c] \kappa(x) dx \int_{-\infty}^{+\infty} f(E) g(E) \exp\left(-\frac{(\Delta G(E, x) + E_r)^2}{4kT \cdot E_r}\right) dE \quad (5)$$

Для розрахунку цього інтеграла були використані наступні припущення:

- окислювально-відновна реакція перебігає на відстані максимального наближення іона, що розряджається, до електрода. Внаслідок цього у формулі (5) зникає інтегрування по координаті;

– розглядається випадок невідродженого електронного газу в електроді ($E - E_F \gg kT$). У такому

$$\text{випадку розподіл Фермі } f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$

можна апроксимувати розподілом Максвелла-Больцмана $f(E) = \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right)$. Це припущення значно спрощує обчислення інтеграла, але звужує застосування одержаної формули. Відповідно до проведеного аналізу, при $E - E_F \gg kT$ ймовірність електронного переходу практично дорівнює нулю, а для розрахунку струмів обміну у випадку $E - E_F \sim kT$ одержані співвідношення будуть непридатні;

– передбачається, що густина квантових рівнів $g(E)$ слабко залежить від енергії електрона й тому її можна винести за знак інтеграла. Це припущення є справедливим для металевих електродів, коли $g(E) \approx g(E_F)$, але у випадку неметалевого електроду $g(E)$ значно залежить від енергії поблизу краю зони, а саме із цих рівнів і відбувається найбільш імовірний електронний перехід. Тому це припущення для неметалічного твердотілого електроду може привести до істотної помилки при розрахунку струмів обміну через відповідну зону.

Проведений аналіз показує, що розрахункові формули для струмів обміну, одержані в рамках теорії Догондзе-Кузнецова-Левича можна використати лише для якісного аналізу конкретних redox реакцій на неметалевому електроді, а інтеграл (5) має потребу в подальшому теоретичному аналізі.

Для більшої конкретизації проведено аналіз енергетичної діаграми з теорії Догондзе-Кузнецова-Левича. Розглянемо випадок неметалізованої поверхні. У цьому випадку, $\Delta_0 - e|\phi_n - \phi_k| > 4kT$

У цій формулі Δ_0 – напівширина забороненої зони, ϕ_n – внутрішній потенціал твердого тіла, ϕ_k – потенціал твердого тіла на поверхні. Тоді $\phi_n - \phi_k$ – падіння потенціалу на поверхні твердого тіла (поверхневий потенціал). Таким чином, за загин енергетичних зон на поверхні відповідає поверхневий потенціал (його знак). У випадку позитивного поверхневого потенціалу вигин енергетичних зон відбувається нагору, у протилежному випадку – вниз.

Тоді вираз $|\phi_n - \phi_k|$ має фізичний зміст абсолютного значення поверхневого потенціалу й дорівнює

$$|\phi_n - \phi_k| = \begin{cases} \phi_n - \phi_k, \text{ якщо } \phi_n - \phi_k > 0 \\ -(\phi_n - \phi_k), \text{ якщо } \phi_n - \phi_k < 0. \end{cases} \quad (6)$$

З іншого боку, вираз $\Delta = \Delta_0 - e|\phi_n - \phi_k|$ має зміст відстані від рівня Фермі, розташованого усередині забороненої зони, до межі валентної зони або зони провідності.

Таким чином, умова $\Delta_0 - e|\phi_n - \phi_k| > 4kT$, відповідає стану, що рівень Фермі розташований у глибині забороненої зони твердого тіла, на відстані, більшій $4kT$ від межі зони провідності або валентної зони.

Відповідно до загальної теорії твердого тіла, якщо рівень Фермі розташований усередині забороненої зони й відстань між ним і краєм кожної із зон більше ніж $4kT$, то тверде тіло називається невідродженим, а для опису статистики електронно-діркового газу можна користуватися функцією розподілу Максвелла-Больцмана:

$$f(E) = -\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right). \quad (7)$$

Таким чином, неметалізована поверхня – це поверхня невідродженого твердого тіла, до якого відносяться власні напівпровідники й діелектрики.

Аналогічно можна провести аналіз для випадку металізованої поверхні:

$$e|\phi_n - \phi_k| - \Delta_0 > 4kT.$$

Тут $|\phi_n - \phi_k|$ також має зміст абсолютного значення поверхневого потенціалу, а вираз $e|\phi_n - \phi_k| - \Delta_0 > 4kT$ означає, що рівень Фермі на поверхні твердого тіла розташований у зоні провідності або валентній зоні на відстані, більшій $4kT$ від межі зони.

У теорії твердого тіла вводиться припущення, що газ вільних носіїв у твердому тілі стає виродженим, якщо рівень Фермі розташований усередині зони провідності або валентної зони, причому глибина занурення рівня Фермі в зону визначає ступінь виродження цього газу:

– *слабовироджений газ вільних носіїв* – рівень Фермі розташований у безпосередній близькості від краю відповідної зони, на відстані, меншій $(4-5) kT$ і занурюється в зону

не більше ніж на $4kT$. Аналіз цього випадку в роботах Догонадзе відсутній.

– *сильновироджений газ вільних носіїв* – рівень Фермі розташований у глибині зони провідності або валентної зони на відстані $(4-5)kT$ і більше від краю зони. У цьому випадку тверде тіло поводить себе як звичайний метал.

Таким чином, умова металізації твердого тіла означає, що розглядається випадок, коли на поверхні твердого тіла газ вільних носіїв сильно вироджений, тобто поверхня поводить себе як нормальний метал (проводить електричний струм, проявляє електрохімічну функцію тощо).

Розглянемо формули для струмів обміну у випадку металізованої (сильно вироджений газ вільних носіїв струму на поверхні твердого тіла) і неметалізованої (невироджений газ вільних носіїв) поверхні твердого тіла. Для конкретності, розглянемо випадок валентної зони.

Формула для струму обміну на невірродженій поверхні через валентну зону:

$$j_0^n = \frac{epl_{ef}}{\hbar} |L|^2 \sqrt{\frac{4\pi kT}{E_s}} \sqrt{c_2 c_3} \cdot e^{\frac{5e(\phi_s - \phi^0(\delta))}{2kT}} \exp\left\{-\frac{[E_s + \Delta_0 - e(\phi_n^0 - \phi_k^0)]^2}{4E_s kT}\right\} \quad (8)$$

Формула для струму обміну на сильно виродженій поверхні через валентну зону:

$$j_0^g = \frac{2\pi epl_{ef}}{\hbar} |L|^2 \sqrt{\frac{2kT}{E_s}} \sqrt{c_2 c_3} \cdot e^{\frac{5e(\phi_s - \phi^0(\delta))}{2kT}} \exp\left\{-\frac{E_s}{4kT}\right\}. \quad (9)$$

Для кращого порівняння цих формул, спростимо перший вираз:

$$\begin{aligned} j_0 &= \frac{epl_{ef}}{\hbar} |L|^2 \sqrt{\frac{4\pi kT}{E_s}} \sqrt{c_2 c_3} \cdot e^{\frac{5e(\phi_s - \phi^0(\delta))}{2kT}} \exp\left\{-\frac{[E_s + \Delta_0 - e(\phi_n^0 - \phi_k^0)]^2}{4E_s kT}\right\} = \\ &= \frac{epl_{ef}}{\hbar} |L|^2 \sqrt{\frac{4\pi kT}{E_s}} \sqrt{c_2 c_3} \times \\ &\times e^{\frac{5e(\phi_s - \phi^0(\delta))}{2kT}} \exp\left\{-\frac{E_s^2 + 2E_s(\Delta_0 - e(\phi_n^0 - \phi_k^0)) + (\Delta_0 - e(\phi_n^0 - \phi_k^0))^2}{4E_s kT}\right\} = \\ &= \frac{epl_{ef}}{\hbar} |L|^2 \sqrt{\frac{4\pi kT}{E_s}} \sqrt{c_2 c_3} \times \\ &\times e^{\frac{5e(\phi_s - \phi^0(\delta))}{2kT}} \exp\left\{-\frac{E_s}{4kT}\right\} \exp\left\{-\frac{\Delta_0 - e(\phi_n^0 - \phi_k^0)}{2kT}\right\} \exp\left\{-\frac{(\Delta_0 - e(\phi_n^0 - \phi_k^0))^2}{4E_s kT}\right\} \quad (10) \end{aligned}$$

Очевидно, що останньою експонентою можна знехтувати. Тому формула для струму обміну через валентну зону у випадку виродженої поверхні твердого тіла має такий вигляд:

$$j_0^n = \frac{epl_{ef}}{\hbar} |L|^2 \sqrt{\frac{4\pi kT}{E_s}} \sqrt{c_2 c_3} e^{\frac{5e(\phi_s - \phi^0(\delta))}{2kT}} \times$$

$$\times \exp\left\{-\frac{E_s}{4kT}\right\} \exp\left\{-\frac{\Delta_0 - e(\phi_n^0 - \phi_k^0)}{2kT}\right\} \quad (11)$$

Звідси безпосередньо видно, що між струмами обміну на невірродженій і значно виродженій поверхні можна записати таке співвідношення:

$$\frac{j_0^n}{j_0^g} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{\Delta_0 - e(\phi_n^0 - \phi_k^0)}{2kT}\right\}. \quad (12)$$

Так як, $\Delta_0 - e(\phi_n - \phi_k)$ – відстань від рівня Фермі, локалізованого в забороненій зоні, до валентної зони, то у випадку, коли ця відстань дорівнює нулю (рівень Фермі збігається із краєм валентної зони), струм $red|ox$ процесу на неметалі з точністю до числового множника описується формулою для струму на металі. Дуже важливо, що у формулу для струмів обміну на виродженій поверхні ширина забороненої зони явно не входить, їй відповідає відстань від рівня Фермі до межі зони. Це значить, що у випадку, коли ширина забороненої зони більша, але рівень Фермі розташований поблизу краю відповідної зони або в самій зоні, то на такому електроді окислювально-відновні процеси будуть проходити як на металевому електроді.

Тобто для того, щоб окислювально-відновний процес на твердому тілі проходив активно необхідно, щоб рівень Фермі був розташований усередині зони провідності або валентної зони, причому занурення рівня Фермі на відстань рівну чи більшу, ніж $4kT$ в зону приводить до того, що поверхня твердого тіла проявляє електрохімічну функцію аналогічно металу (металізується), при цьому ширина забороненої зони може бути великою.

4. Підсумки результатів

Таким чином, для того, щоб тверде тіло із широкою забороненою зоною почало проявляти електрохімічну активність, необхідно, щоб рівень Фермі перебував від краю однієї із зон на відстані, меншій ніж $4kT$, причому подальше наближення рівня Фермі до зони, з наступним зануренням його в саму зону на поверхні твердого тіла, приводить до виродження газу вільних носіїв струму, а саме тверде тіло поводить себе, як метал.

Змінити положення рівня Фермі щодо країв зони провідності й валентної зони можна такими двома способами:

- зовнішнім електричним полем, направленим перпендикулярно поверхні твердого тіла;
- поляризуючою дією молекули або іона, адсорбованого на поверхні твердого тіла.

5. Висновки

Виходячи із проведеного аналізу, можна запропонувати наступні варіанти виникнення електрохімічної функції у твердому тілі із широкою забороненою зоною:

1. *Адсорбція реагуючого іона на поверхні електрода.* Наслідком цього є поляризація поверхні твердого тіла, тобто в межах невеликого кластера поверхні відбувається зміна його енергетичної структури. Змінюється ширина забороненої зони і, що особливо важливо, положення рівня Фермі щодо країв зони провідності й валентної зони. У випадку слабкої поляризуючої дії іона, кластер з адсорбованим іоном практично не відрізняється від іншої (чистої) поверхні; у цьому випадку тверде тіло залишається діелектриком без появи електрохімічної функції. Якщо ж іон значно поляризує кластер поверхні, то рівень Фермі різко наближається до межі однієї із зон і такий кластер потенційно може набути властивостей напівметалу або навіть металу.

2. *Прикладання зовнішнього електричного поля до електрода.* Внаслідок ефекту впливу електричного поля, вся поверхня твердого тіла

поляризується залежно від знака прикладеного поля. Нехай адсорбований іон поляризує кластер поверхні у бік зони провідності (тобто рівень Фермі й дно зони провідності різко зближуються). У цьому випадку, приклавши до електрода катодну перенапругу, енергетичні зони будуть вигинатися вниз, що призведе до наближення мінімуму зони провідності до рівня Фермі по всій поверхні твердого тіла, а значить в усьому обсязі виділеного кластера, причому в самому кластері рівень Фермі і край зони провідності можуть наблизитися на відстань, менше $4kT$. Наслідком цього є виродження електронного газу в кластері, а значить такий кластер набуває напівпровідникові властивості. Подальше збільшення катодної напруги приводить до перетинання рівнем Фермі зони провідності, внаслідок чого кластер поверхні матиме енергетичну структуру класичного металу, а виходить, такий кластер стає провідним і здатним до окислювально-відновних процесів.

У випадку, якщо іон поляризує кластер поверхні в бік валентної зони, то катодна напруга, прикладена до такого електрода, призводить до віддалення рівня Фермі від валентної зони, а значить, на такому електроді окислювально-відновлювані процеси не зможуть реалізуватися.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ponseca C. S., Chábera P., Uhlig J., Persson P. & Sundström V. Ultrafast electron dynamics in solar energy conversion. *Chem. Rev.* 2017. № 117. P. 10940–11024.
2. Wu K. & Lian T. Quantum confined colloidal nanorod heterostructures for solar-to-fuel conversion. *Chem. Soc. Rev.* 2016. № 45. P.3781–3810.
3. Adams, D. M. et al. Charge transfer on the nanoscale: current status. *J. Phys. Chem.* 2003. № 107. P. 6668–6697.
4. Adams, D. M. et al. Charge transfer on the nanoscale: current status. *J. Phys. Chem.* 2003. № 107. P. 6668–6697.
5. Zhu, H., Yang, Y., Wu, K. & Lian, T. Charge transfer dynamics from photoexcited semiconductor quantum dots. *Annu. Rev. Phys. Chem.* 2016. № 67. P. 259–281.
6. Ihly, R. et al. Tuning the driving force for exciton dissociation in single-walled carbon nanotube heterojunctions. *Nat. Chem.* 2016. № 8. P. 603–609.
7. Hong, X. et al. Ultrafast charge transfer in atomically thin MoS₂/WS₂ heterostructures. *Nat. Nanotechnol.* 2014. № 9. P. 682–686.
8. Tisdale, W. A. et al. Hot-electron transfer from semiconductor nanocrystals. *Science.* 2010. № 328. P. 1543–1547.
9. Robel, I., Kuno, M. & Kamat, P. V. Size-dependent electron injection from excited CdSe quantum dots into TiO₂ nanoparticles. *J. Am. Chem. Soc.* 2007. № 129. P. 4136–4137.
10. Harris, R. D. et al. Electronic processes within quantum dot-molecule complexes. *Chem. Rev.* 2016. № 116. P. 12865–12919.
11. Marcus, R. A. On the theory of oxidation-reduction reactions involving electron transfer. I. *J. Chem. Phys.* 1956. № 24. P. 966–978.
12. Marcus, R. & Sutin, N. Electron transfers in chemistry and biology. *Biochim. Biophys. Acta.* 1985 № 811. P. 265–322.

13. Miller, J. R., Calcaterra, L. T. & Closs, G. L. Intramolecular long-distance electron transfer in radical anions. The effects of free energy and solvent on the reaction rates. *J. Am. Chem. Soc.* 1984. № 106. P. 3047–3049.
14. Closs, G. L., Calcaterra, L. T., Green, N. J., Penfield, K. W. & Miller, J. R. Distance, stereoelectronic effects, and the Marcus inverted region in intramolecular electron transfer in organic radical anions. *J. Phys. Chem.* 1986. № 90. P. 3673–3683.
15. Closs, G. L. & Miller, J. R. Intramolecular long-distance electron transfer in organic molecules. *Science* 1988. № 240. P. 440–447.
16. Han, Y. et al. Bias-polarity-dependent direct and inverted Marcus charge transport affecting rectification in a redox-active molecular junction. *Adv. Sci.* 2021 № 8. P. 210-255.
17. Atxabal, A. et al. Tuning the charge flow between Marcus regimes in an organic thin-film device. *Nat. Commun.* 2019. № 10. P. 2089.
18. Yuan, L. et al. Transition from direct to inverted charge transport Marcus regions in molecular junctions via molecular orbital gating. *Nat. Nanotechnol.* 2018. № 13. P. 322–329.
19. Parada, G. A. et al. Concerted proton-electron transfer reactions in the Marcus inverted region. *Science.* 2019. № 364. P. 471–475.
20. Scholes, G. D., Jones, M. & Kumar, S. Energetics of photoinduced electron-transfer reactions decided by Quantum confinement. *J. Phys. Chem.* 2007. № 111. P. 13777–13785.
21. Tarafder, K., Surendranath, Y., Olshansky, J. H., Alivisatos, A. P. & Wang, L.-W. Hole transfer dynamics from a CdSe/CdS quantum rod to a tethered ferrocene derivative. *J. Am. Chem. Soc.* 2014. № 136. P. 5121–5131.
22. Tvrđy, K., Frantsuzov, P. A. & Kamat, P. V. Photoinduced electron transfer from semiconductor quantum dots to metal oxide nanoparticles. *Proc. Natl Acad. Sci.* 2011. № 108. P. 29–34.
23. Zhu, H. et al. Auger-assisted electron transfer from photoexcited semiconductor quantum dots. *Nano Lett.* 2014. № 14. P. 1263–1269.
24. Olshansky, J. H., Ding, T. X., Lee, Y. V., Leone, S. R. & Alivisatos, A. P. Hole transfer from photoexcited quantum dots: the relationship between driving force and rate. *J. Am. Chem. Soc.* 2015. № 137. P. 15567–15575.

ЗМІСТ

Володимир ГОЛОВАЦЬКИЙ, Ігор ГОЛОВАЦЬКИЙ РОЗРАХУНОК СИЛИ ВЗАЄМОДІЇ ЦИЛІНДРИЧНИХ МАГНІТІВ.....	3
Микола ГОЛОВІН, Ніна ГОЛОВІНА МЕХАНІЗМИ КРИТИЧНОГО МИСЛЕННЯ ТА НАВЧАННЯ ФІЗИКИ І ПРОГРАМУВАННЯ.....	15
Андрій КЕВШИН, Володимир ГАЛЯН, Аліна ТРЕТЯК, Юлія АРТЮХ, Володимир ШАФАРЧУК, Олександр НИКИФОРОВ, Денис КУРШЕЛЬ ВИКОРИСТАННЯ ПРАКТИЧНИХ ТА ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ ПІД ЧАС ВИВЧЕННЯ СКЛАДНИХ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В КУРСІ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ.....	27
Олександр МАРТИНЮК, Галина МИРОНЧУК, Сергій ПАНКЕВИЧ ОРГАНІЗАЦІЙНО-МЕТОДИЧНІ УМОВИ ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ЛАБОРАТОРІЙ У СИСТЕМІ ВПРОВАДЖЕННЯ ОСВІТНЬОГО НАПРЯМУ STEM.....	34
Галина МИРОНЧУК, Тарас МЕЛЬНИЧУК, Ярослав ЄНДРИКА, Вайдотас КАЖУКАУСКАС ОПТИЧНІ ТА НЕЛІНІЙНО-ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КРИСТАЛІВ AgGaGeS_4 , ЛЕГОВАНИХ Er	41
Юрій МІНАЄВ, Наталія ТИХОНСЬКА, Денис ШАЛАТОВ НАВЧАННЯ СТАРШОКЛАСНИКІВ ПРИЙОМІВ КРИТИЧНОГО МИСЛЕННЯ НА ПРИКЛАДІ АНАЛІЗУ СТАТТІ ПРО РОЗРАХУНОК ПЕРІОДУ КОЛИВАНЬ МАЯТНИКА У ВИПАДКУ ДОВІЛЬНИХ АМПЛІТУД.....	48
Олексій НОВОСАД, Павло ШИГОРІН, Богдан ВЕНГРИН, Володимир БОЖКО ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ CuIn_5S_8 - CdIn_2S_4	56
Анастасія ОМЕЛЬЧУК, Леся БУЛАТЕЦЬКА, Віталій БУЛАТЕЦЬКИЙ ОГЛЯД ПОШИРЕНИХ ХМАРНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ПОБУДОВИ ER-ДІАГРАМ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ БАЗ ДАНИХ.....	62
Мирон РУДИШ, Галина МИРОНЧУК, Оксана РУДИШ АНІЗОТРОПІЯ ПРУЖНИХ ТА АКУСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КРИСТАЛІВ AgGaTe_2	70
Анатолій СІЛЬВЕЙСТР, Микола МОКЛЮК РЕАЛІЗАЦІЯ НАВЧАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ З ФІЗИКИ У ДИСЦИПЛІНАХ ХІМІЧНОГО І БІОЛОГІЧНОГО СПРЯМУВАННЯ.....	79
Дмитро СТЕПАНЧИКОВ, Регіна ВАСИЛЬЄВА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РАДІОАКТИВНОГО РОЗПАДУ: СТАТИСТИЧНИЙ ПІДХІД.....	87
Оксана СТЕЦЮК ФОРМУВАННЯ ДОСЛІДНИЦЬКИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ ПРИ НАВЧАННІ ФІЗИКИ НА ЗАСАДАХ STEM-ОСВІТИ.....	95
Petro ТРОКНІМСНУСК MAIN PROBLEMS OF MODELING LASER-INDUCED BREAKDOWN OF MATTER.....	101
Тетяна ЯЦИНЮК, Андрій КЕВШИН, Володимир ГАЛЯН, Інна ІВАЩЕНКО, Ганна ШАВАРОВА, Микола ШЕВЧУК, Костянтин МЕЛЬНИЧУК, Дмитро ІВАНЮК ЛЮМІНЕСЦЕНТНІ ВЛАСТИВОСТІ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ У СКЛЯНИХ СЕРЕДОВИЩАХ.....	107

Світлана ЯЦЮК, Валентина ЮНЧИК, Іван СМОЛЮК, Оксана СОБЧУК

АКАДЕМІЧНА ДОБРОЧЕСНІСТЬ В КОНСТЕКТІ ОСВІТНЬОГО КОМПОНЕНТУ

«ВСТУП ДО ФАХУ» ДЛЯ МАЙБУТНІХ ВЧИТЕЛІВ ІНФОРМАТИКИ.....116

Людмила СОЛЯНИК

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ДОГОНАДЗЕ-КУЗНЄЦОВА-ЛЕВИЧА

ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ЕЛЕМЕНТАРНОГО АКТУ REDOX ПРОЦЕСУ

НА МІЖФАЗНІЙ МЕЖІ ТВЕРДЕ ТІЛО-ЕЛЕКТРОЛІТ.....124

CONTENTS

<i>Volodymyr HOLOVATSKY, Ihor HOLOVATSKYI</i> MAGNETIC SPRING ON THE BASE RING MAGNET.....	3
<i>Mykola HOLOVIN, Nina HOLOVINA</i> MECHANISMS OF CRITICAL THINKING AND LEARNING PHYSICS AND PROGRAMMING.....	15
<i>Andriy KEVSHYN, Volodymyr HALYAN, Alina TRETAK, Yulia ARTIUKH, Volodymyr SHAFARCHUK, Oleksandr NYKYFOROV, Denys KURSHEL</i> THE USE OF PRACTICAL AND LABORATORY CLASSES IN THE STUDY OF COMPLEX LINEAR ELECTRIC CIRCUITS OF DIRECT CURRENT IN THE COURSE OF ELECTRICAL ENGINEERING.....	27
<i>Oleksandr MARTYNIUK, Galina MYRONCHUK, Serhii PANKEVYCH</i> ORGANIZATIONAL AND METHODOLOGICAL CONDITIONS FOR THE USE OF DIGITAL LABORATORIES IN THE SYSTEM OF STEM EDUCATIONAL DIRECTION IMPLEMENTATION.....	34
<i>Galyna MYRONCHUK, Taras MELNYCHUK, Jaroslaw JEDRYKA, Vaidotas KAŽUKAUSKAS</i> OPTICAL AND NON-LINEAR OPTICAL PROPERTIES OF Er-DOPED AgGaGeS ₄ CRYSTALLITES.....	41
<i>Yurii MINAIEV, Nataliia TIHONSKA, Denys SHALATOV</i> TEACHING HIGH SCHOOL STUDENTS CRITICAL THINKING TECHNIQUES USING ANALYSIS OF AN ARTICLE ABOUT CALCULATING THE PERIOD OF PENDULUM OSCILLATIONS IN THE CASE OF ARBITRARY AMPLITUDES.....	48
<i>Oleksii NOVOSAD, Pavlo SHYGORIN, Bohdan VENHRYN, Volodymyr BOZHKO, Oleg SHYGORIN</i> ELECTRICAL AND THERMOELECTRICAL PROPERTIES OF CuIn ₅ S ₈ -CdIn ₂ S ₄ SOLID SOLUTIONS.....	56
<i>Anastasiia OMELCHUK, Lesia BULATETSKA, Vitalii BULATETSKYI</i> REVIEW OF COMMON CLOUD TOOLS FOR BUILDING ER-DIAGRAMS FOR STUDYING DATABASES.....	62
<i>Myron RUDYSH, Galina MYRONCHUK, Oksana RUDYSH</i> ANISOTROPY OF ELASTIC AND ACOUSTIC PROPERTIES OF AgGaTe ₂ CRYSTALS.....	70
<i>Anatolii SILVEISTR, Mykola MOKLIUK</i> IMPLEMENTATION OF EDUCATIONAL MATERIAL IN PHYSICS IN THE DISCIPLINES OF CHEMICAL AND BIOLOGICAL DIRECTION.....	79
<i>Dmytro STEPANCHYKOV, Regina VASYLEVA</i> SIMULATION OF THE RADIOACTIVE DECAY PROCESS: STATISTICAL APPROACH.....	87
<i>Oksana STETSIUK</i> FORMATION OF RESEARCH COMPETENCES IN TEACHING PHYSICS ON THE BASIS OF STEM-EDUCATION.....	95
<i>Petro TROKHIMCHUCK</i> MAIN PROBLEMS OF MODELING LASER-INDUCED BREAKDOWN OF MATTER.....	101

<i>Tetiana YATSYNIUK, Andriy KEVSHYN, Volodymyr HALYAN, Inna IVASHCHENKO, Ganna SHAVAROVA, Mykola SHEVCHUK, Kostiantyn MELNYCHUK, Dmytro IVANIUK</i> LUMINESCENT PROPERTIES OF RARE-EARTH METALS IN GLASS ENVIRONMENTS.....	107
<i>Svitlana YATSIUK, Valentina YUNCHIK, Ivan SMOLYUK, Oksana SOBCHUK</i> ACADEMIC INTEGRITY IN CONTEXT EDUCATIONAL COMPONENTS “INTRODUCTION TO THE PROFESSION” FOR FUTURE IT TEACHERS.....	116
<i>Ludmila SOLYANIK</i> ANALYSIS OF THE APPLICATION OF THE DOGHONADZE-KUZNETSOVA-LEVYCH THEORY IN THE STUDY OF THE ELEMENTARY ACT OF THE RED OX PROCESS AT THE SOLID-ELECTROLYTE INTERPHASE BOUNDARY.....	124

ФІЗИКА ТА ОСВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Випуск 1

Коректура • Ірина Миколаївна Чудеснова

Комп'ютерна верстка • Наталія Сергіївна Кузнецова

Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 15,81. Замов. № 0922/359. Наклад 300 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.