

Волинський національний університет
імені Лесі Українки

ФІЗИКА ТА ОСВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Випуск 1



Видавничий дім
«Гельветика»
2025

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 Ченстохові, 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
30 квітня 2025 р., протокол № 5

Науковий журнал «Фізика та освітні технології»
zareєстровано Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення
(Рішення № 1834 від 21.12.2023 року. Ідентифікатор медіа: R30-02336)

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Волинський національний університет імені Лесі Українки
(просп. Волі, буд. 13, м. Луцьк Волинської обл., 43025, post@vnu.edu.ua, тел. (0332) 720123).

Періодичність: 2 рази на рік.
Мови видання: українська, англійська, німецька, польська, іспанська, французька, болгарська.

«Фізика та освітні технології» включено до Переліку наукових фахових видань України категорії Б у галузі освіти/педагогіка (спеціальності А4 – Середня освіта (за предметними спеціальностями); Е5 – Фізика та астрономія; Е6 – 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, 2025

УДК 53:378.147

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-1>

Катерина ГЕРАСИМОВА

кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики та фізики, Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, Дніпропетровська обл., Україна, 50027

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8714-1006>

Бібліографічний опис статті: Герасимова, К. (2025). Апроксимація на лабораторних заняттях з фізики у технічних університетах. *Фізика та освітні технології*, 1, 3–9, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-1>

АПРОКСИМАЦІЯ НА ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТТЯХ З ФІЗИКИ У ТЕХНІЧНИХ УНІВЕРСИТЕТАХ

У статті розглядаються методи апроксимації експериментальних даних при проведенні лабораторного практикуму з фізики у технічних університетах. Актуальність обраної теми пояснюється тим, що від вибору методу апроксимації залежить успішність і правильність визначення кількісних та якісних характеристик досліджуваних об'єктів. Проблема полягає у правильному виборі методу апроксимації для вирішення конкретних практичних завдань.

У роботі проведено огляд наукових публікацій і досліджень щодо обраної теми, наведено основні поняття і визначення теорії апроксимації. Дано означення двох типів апроксимації: строгої математичної і фізичної (технічної) апроксимації. Проаналізовано методи, конкретизовано та сформульовано вимоги, що висуваються до апроксимації експериментальних даних. Визначено загальне завдання апроксимації – правильний вибір апроксимуючої функції. Розкрито поняття згладжування кривої і методу найменших квадратів. Дано визначення видів апроксимації, що використовуються у комп'ютерній програмі MS Excel. Розглянуто можливість використання лінійної апроксимації методом найменших квадратів у фізичних дослідженнях. Наведено математичні формули, що стосуються цього методу. Вказано на особливості методики виконання лабораторних робіт за допомогою фізичної апроксимації для здобувачів-першокурсників, з урахуванням їх недостатньої базової математичної підготовки для виконання розрахунків. На конкретному прикладі показано застосування методу найменших квадратів, який використовується у лабораторному практикумі з фізики. Наведено відповідні розрахунки, визначено переваги і недоліки обраного методу, зроблено висновок щодо доцільності його застосування. Визначено напрямок подальшого дослідження інших видів апроксимації з метою їх ефективного впровадження у навчальний процес з фізики.

Ключові слова: апроксимація, фізика, експеримент, апроксимуюча функція, фізична модель, лабораторний практикум, метод найменших квадратів.

Kateryna HERASYMOVA

Candidate of Technical Sciences), Associate Professor at the Department of Higher Mathematics and Physics, Kryvyi Rih National University, 11 Vitaly Matusevich str., Kryvyi Rih, Dnipropetrovsk region, Ukraine, 50027

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8714-1006>

To cite this article: Herasymova, K. (2025). Aproksymatsiya na laboratornykh zanyattiyakh z fizyky u tekhnichnykh universytetakh [Approximation in physics laboratory classes at technical universities]. *Physics and Educational Technology*, 2, 3–9, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-1>

APPROXIMATION IN PHYSICS LABORATORY CLASSES AT TECHNICAL UNIVERSITIES

The article discusses the methods of approximation of experimental data in the course of a laboratory practicum in physics at technical universities. The relevance of the chosen topic is explained by the fact that the choice of an approximation method determines the success and correctness of determining the quantitative and qualitative characteristics of the objects under study. The problem is to choose the right approximation method to solve specific practical problems.

The paper reviews scientific publications and studies on the chosen topic, provides the basic concepts and definitions of the approximation theory. Two types of approximation are defined: strict mathematical and physical (technical) approximation. The methods are analyzed, the requirements for approximation of experimental data are specified

and formulated. The general task of approximation is defined – the correct choice of the approximating function. The concepts of curve smoothing and the least squares method are revealed. The types of approximation used in the MS Excel computer programs are defined. The possibility of using linear approximation by the least squares method in physical research is considered. Mathematical formulas related to this method are presented. The peculiarities of the methodology for performing laboratory work using physical approximation for first-year students are indicated, taking into account their insufficient basic mathematical training to perform calculations. A specific example is used to demonstrate the application of the least squares method used in a physics laboratory workshop. The relevant calculations are presented, the advantages and disadvantages of the chosen method are determined, and a conclusion is made about the feasibility of its application. The direction of further research of other types of approximation for the purpose of their effective implementation in the educational process in physics is determined.

Key words: approximation, physics, experiment, approximating function, physical model, laboratory practicum, least squares method.

Актуальність проблеми. Фізика у технічних університетах вивчається з першого курсу. На лабораторних заняттях перед викладачем постають певні методичні труднощі, оскільки існує розрив між базовим рівнем математичної підготовки здобувачів і їх знаннями з вищої математики, необхідними для виконання лабораторних робіт. Для подолання цього розриву розробляються методичні вказівки, що містять короткий і доступний виклад теорії та інструкцію щодо виконання робіт. Для статистичної обробки даних викладач має навчити здобувачів користуватися можливостями сучасних комп'ютерних технологій (Іщенко, 2017).

Апроксимація – актуальна тема практично кожного експериментального дослідження. Опрацювання результатів, записаних у таблиці, часто виявляється незручним. Масив даних бажано подати у вигляді нескладних аналітичних залежностей, що відображають характер експериментальних залежностей. Для цього необхідно розв'язати завдання апроксимації, тобто замінити складну функцію, побудовану за експериментальними даними, наближеним аналітичним виразом. Проблема полягає у правильному виборі виду апроксимації для вирішення конкретних практичних завдань.

Аналіз досліджень і публікацій. На сьогодні сучасна вітчизняна наукова література із загальної теорії апроксимації, на жаль, представлена недостатньо.

Перелічимо деякі основні поняття та визначення щодо теми дослідження.

Апроксимація (від лат. *approximatio* – наближення) – «вираження одних математичних об'єктів іншими, близькими за значенням, але простішими за структурою. А. дає змогу дослідити числові характеристики і якісні властивості об'єкта за допомогою дослідження

простіших або зручніших об'єктів, характеристики яких відомі або їх простіше знайти» (Янченко, 2020, с. 58; Крилик, Богач & Прокопова, 2013, с. 86).

Наближення – те саме, що апроксимація. Прикладами апроксимації є наближене вираження кривих ліній ламаними, ірраціональних чисел – раціональними, довільних неперервних функцій многочленами тощо.

Інтерполяція (від лат. *inter* – між, *polio* – виправляю, полірую) – знаходження проміжних значень функції за відомими її дискретними значеннями. Інтерполяція є різновидом апроксимації, при якій крива побудованої функції має проходити через всі наявні точки даних.

Екстраполяція (від лат. *extra* – поза, зовні, *polio* – виправляю, полірую) – особливий тип апроксимації, при якому функція апроксимується поза заданим інтервалом, а не між відомими її заданими значеннями. Часто використовується для прогнозування, аналізу даних та візуалізації результатів дослідження (Чорний, Титюк, Істоміна & Власенко, 2016, с. 91).

Модель (від лат. *modus* – міра) – «спрощене уявлення про реальний об'єкт, процес або явище» (Мороз, 2002, с. 391). Моделлю може бути графік, схема, знакова система, структура тощо. Знання, отримані в результаті дослідження моделі, екстраполюються на оригінал та використовуються у науці.

Моделювання – «науковий метод прямого (опосередкованого) дослідження об'єктів через їх моделі, якщо безпосереднє вивчення об'єктів неможливе чи ускладнене» (Мороз, 2002, с. 392). Моделювання тісно взаємодіє з іншими науковими методами, зокрема експериментальними.

Адекватність (від лат. *adaequatus* – прирівняний, рівний) – відповідність, вірність, точність. Точність вимірювання – характеристика,

що відображає ступінь близькості результатів вимірювання до істинного значення вимірюваної величини.

При вивченні явища за допомогою його моделі важливо з'ясувати, чи відповідає модель експериментальним результатам у межах заданої точності спостережень. У зв'язку з цим необхідно перевірити адекватність моделі до властивостей реального об'єкта, причому точність моделі має бути більшою, ніж точність спостережень (тобто похибка моделі має бути меншою від похибки спостережень).

Апроксимацію умовно поділяють на строгу математичну і фізичну (технічну). Строга математична апроксимація – це фундаментальна теорія, що є підґрунтям фізичної апроксимації. Фізична апроксимація – модель фізичного явища, процесу, характеристик пристрою, параметрів сигналу, середовища, матерії тощо, є менш строгою, ніж математична теорія. Фізична апроксимація реалізується достатньою кількістю способів та апроксимуючих функцій, які обирають, виходячи з конкретно поставленого технічного завдання (Несмашний, Ткаченко & Герасимова, 2019).

Покажемо на прикладі формування теорії теплового випромінювання важливість апроксимації як фізичної, так і строгої математичної. Спочатку, на підставі експериментальних даних, були встановлені емпіричні закони випромінювання Стефана – Больцмана та закон зміщення Віна. Потім теоретично виведені та експериментально підтверджені для окремих випадків закони випромінювання Віна та Релея – Джинса. Згодом Планком була висунута квантова гіпотеза, що дала фундаментальний закон випромінювання – формулу Планка, яка блискуче узгоджується з експериментальними даними в усіх інтервалах частот і температур. Слід зазначити, що закони Стефана – Больцмана, Віна, Релея – Джинса є окремими проявами формули Планка (Лопатинський, Зачек, Ільчук & Романишин, 2009, с. 256-260).

Розглянуті дослідження – це не що інше, ніж *метод індукції* (від лат. *inductio* – наведення) – висновок, що поширюється від поодиноких фактів на деяке загальне твердження. Існує й інший, «конкуруючий» метод дослідження – *дедукція* (від лат. *deductio* – виведення). Посилками (початком) дедукції є загальні твердження,

наприклад, аксіоми, постулати або гіпотези («загальне»), а кінцем – наслідки з посилок, теореми («окреме»). Умовно кажучи, строга теорія математичної апроксимації є «загальним», а фізична апроксимація – «окремим».

Загальне завдання апроксимації – вибір апроксимуючої функції. Одним із методів апроксимації є *згладжування кривої*, яку намагаються провести так, щоб її відхилення від табличних даних було мінімальним. Як критерій оптимального згладжування часто використовують мінімум суми квадратів відхилень значень аналітичної функції, що задає апроксимуючу криву, від експериментальних значень. Цей відомий і ефективний метод апроксимації був запропонований німецьким математиком К.-Ф. Гаусом і називається *методом найменших квадратів* (Крилик, Богач & Прокопова, 2013, с. 87).

У комп'ютерній програмі MS Excel згладжування кривої виконується за допомогою побудови *лінії тренду* і використовуються такі *види апроксимації*:

1) *лінійна* (Linear) – застосовуються, коли швидкість зміни експериментальних даних відносно постійна;

2) *логарифмічна* (Logarithmic) – описує експериментальні дані, які спочатку стрімко зростають (убувають), а потім поступово стабілізуються;

3) *поліноміальна* (Polynomial) – описує знакозмінні зростаючі і спадні експериментальні дані;

4) *степенна* (Power) – застосовуються, коли швидкість зміни експериментальних даних постійно зростає (зменшується);

5) *експоненціальна* (Exponential) – використовується для опису експериментальних даних, швидкість зростання (зменшення) яких безупинно зростає;

6) *лінійна фільтрація* (Moving average) – використовується як середнє значення до наближення, дозволяє згладити коливання даних і показати характер залежності.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо лінійну апроксимацію у фізичних експериментальних дослідженнях. Дослідні залежності між фізичними величинами, як правило, нелінійні. Однак, багато з них можна лінеаризувати, тобто представити у вигляді лінійних.

Нехай отримано n залежностей між двома фізичними величинами x та y . Кожній парі (x_i, y_i) цих величин відповідає i -та точка на координатній площині XOY . Будуємо ці точки. Таким чином, на площині маємо множину n точок. Далі знаходимо лінійну аналітичну функцію $y = f(x)$, яка б «найкращим чином» описувала цю множину точок. У реальних умовах досліду всі експериментальні точки «не лягають» на пряму. Причиною таких відхилень можуть бути похибки вимірювань, невисока точність вимірювальних приладів, суб'єктивні чинники тощо. Пряму, яка найменше відхиляється від експериментальних точок, зручно побудувати за допомогою *методу найменших квадратів* (Лісікова & Цибульник, 2017).

Припускаємо, що між x і y існує лінійна залежність виду $y = kx + b$, де $k = \operatorname{tg} \alpha$ – кутовий коефіцієнт прямої, що дорівнює тангенсу кута нахилу прямої до додатного напрямку осі OX , b – відстань від початку координат до точки перетину прямої з віссю OY . Лінійна залежність зумовлена двовірним нормальним законом розподілу пар випадкових величин (x_i, y_i) . Для побудови графіку треба обчислити k і b .

Наближення функції $y = f(x)$ до експериментальної залежності вважається найкращим, якщо виконується умова мінімуму суми квадратів відхилень аналітичної функції від експериментальної залежності, тобто щоб вираз $\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \rightarrow \min$. У математиці строго доведено, що вираз аналітичної функції має задовольняти систему так званих *нормальних рівнянь*:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n y_i = k \sum_{i=1}^n x_i + bn; \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i = k \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i, \end{cases} \quad (1)$$

де n – кількість експериментальних точок (Клепко & Голець, 2009, с. 358).

Розв'язують систему (1), обчислюють значення k і b . Ці ж величини можна визначити за іншими робочими формулами, які виводять із (1):

$$\begin{aligned} k &= \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}; \\ b &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Як бачимо, метод найменших квадратів потребує громіздких обчислень. Однак безумовною перевагою цього методу є висока точність наближення апроксимуючої функції до реальної експериментальної залежності.

Даний метод апроксимації розглянемо на прикладі лабораторної роботи «Вивчення температурної залежності опору металевих провідників». Мета роботи – вивчити температурну залежність опору металів і визначити температурний коефіцієнт опору вольфраму.

Відомо, що електричний опір речовин залежить від температури. Залежність опору металів R від температури t вважається лінійною:

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (3)$$

де α – температурний коефіцієнт опору, що характеризує приріст опору при збільшенні температури на один градус; R_0 – опір при температурі 0°C .

У лабораторній роботі вимірюють опір вольфрамового провідника при його нагріванні. Дослідні дані наведені у таблиці 1.

Досліди показують, що при збільшенні температури опір збільшується. Якщо побудувати експериментальні точки (рис. 1), то можна припустити, що між змінними R і t існує деяка лінійна аналітична залежність

$$R = kt + b. \quad (4)$$

Для визначення цієї залежності проводимо додаткові розрахунки, які разом з експериментальними даними заносимо до таблиці 2. Правильність усіх розрахунків можна перевірити,

Таблиця 1

Експериментальні залежності електричного опору від температури

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$t, ^\circ\text{C}$	20,2	24,3	28,5	32,2	36,5	40,1	44,2	47,9
$R, \text{Ом}$	86,3	87,1	88,7	89,7	91,8	93,2	94,9	96,4

Таблиця 2

Результати експерименту і розрахунків

№	1	2	3	4	5	6	7	8	Сума
$t, ^\circ C$	20,2	24,3	28,5	32,2	36,5	40,1	44,2	47,9	273,9
$R, Ом$	86,3	87,1	88,7	89,7	91,8	93,2	94,9	96,4	728,1
$R \cdot t$	1743,26	2116,53	2527,95	2888,34	2888,34	3737,32	4194,58	4617,56	25176,24
R^2	7447,69	7586,41	7867,69	8046,09	8427,24	8686,24	9006,01	9292,96	66360,33
t^2	408,04	590,49	812,25	1036,84	1332,25	1608,01	1953,64	2294,41	10035,93
$R_{розр}, Ом$	85,73	87,28	88,86	90,26	91,88	93,24	94,78	96,18	728,21

порівнюючи суми значень експериментального і розрахункового опорів.

За формулами (2) обчислюємо значення k і b :

$$k = \frac{8 \cdot 25176,24 - 273,9 \cdot 728,1}{8 \cdot 10035,93 - (273,9)^2} = 0,3766; \quad (5)$$

$$b = \frac{10035,93 \cdot 728,1 - 273,9 \cdot 25176,24}{8 \cdot 10035,93 - (273,9)^2} = 78,118.$$

Підставимо ці значення в (4) і запишемо аналітичну залежність між R і t :

$$R = 0,3766t + 78,118. \quad (6)$$

Підставимо у (6) значення температур з таблиці 2, одержимо розрахункові значення опорів $R_{розр}$, які також заносимо до таблиці 2. За значеннями розрахункових опорів і відповідними до них температурами будуємо *лінію регресії*, тобто пряму, від якої всі експериментальні точки відхиляються якнайменше (Косуліна, 2020).

Побудову експериментальних точок і лінії регресії зручно виконувати у комп'ютерній програмі MS Excel (рис. 1).

Екстраполюємо лінію регресії до перетину з віссю R (рис. 2). Визначаємо температурний коефіцієнт опору α за формулою:

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_0(t_2 - t_1)}, \quad (7)$$

де R_0 – точка перетину прямої з віссю OY , визначає опір провідника при $t = 0 ^\circ C$, її значення з точністю до тисячних співпадає обчисленим раніше параметром $b = R_0 = 78,118$ ($\square <$); R_1, R_2, t_1, t_2 – координати двох довільно взятих точок 1 і 2 на графіку (рис. 2).

$$\alpha = \frac{91,3 - 83,8}{78,118(35 - 15)} = 0,0048 (^\circ C^{-1}). \quad (8)$$

Отримане значення α порівнюємо з відомим табличним значенням α_t температурного коефіцієнту опору вольфраму ($\alpha_t = 0,0046 ^\circ C^{-1}$). Обчислюємо відносну похибку визначення α :

$$\delta = \frac{|\alpha_t - \alpha|}{\alpha_t} \cdot 100\% = \frac{|0,0046 - 0,0048|}{0,0046} \cdot 100\% = 4,34\%. \quad (9)$$

Отримана похибка є незначною, тобто експериментальний результат добре узгоджується

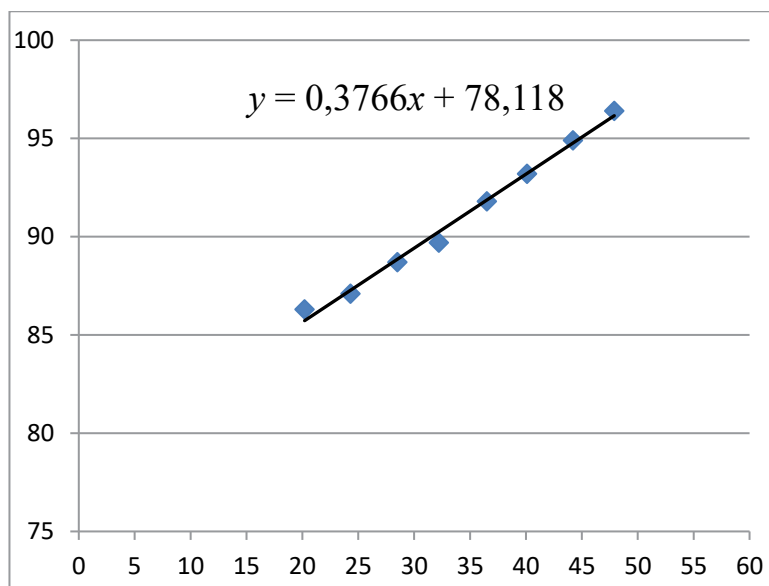


Рис. 1. Експериментальні точки і лінія регресії

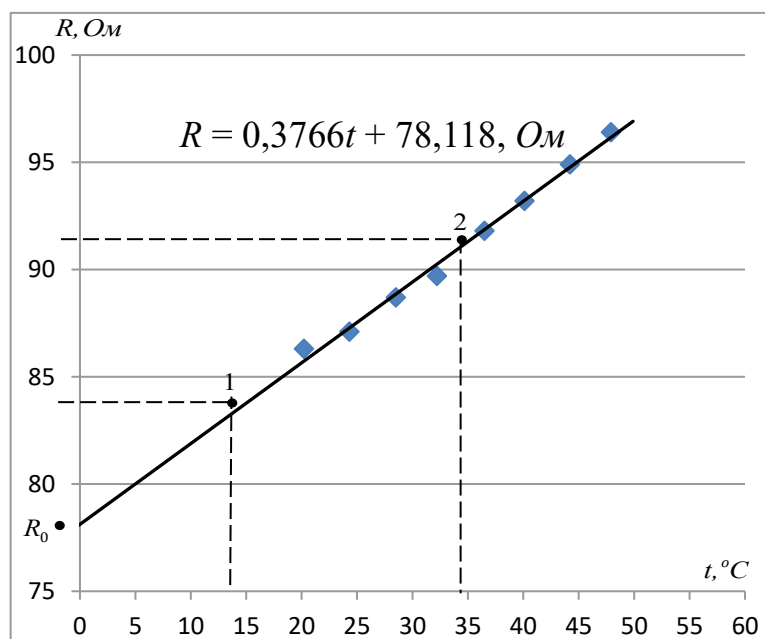


Рис. 2. Графічне визначення температурного коефіцієнту опору

з теоретичним значенням коефіцієнту опору вольфраму.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Апроксимуючі функції мають якомога точно описувати характеристики реальних процесів. Установлено, що підвищення точності апроксимації часто призводить до ускладнення апроксимуючих функцій, що в свою чергу ускладнює аналіз процесів. Тому під час розв'язання задачі апроксимації так, як і при розв'язанні будь-якої задачі, пов'язаної з вибором моделі, необхідно обирати між точністю і складністю моделі.

Розглянутий метод найменших квадратів, хоч і вимагає громіздких обчислень, забезпечує найменше відхилення апроксимуючої функції від вихідної функції, тому його доцільно застосовувати, коли необхідна висока точність апроксимації. У цьому ми переконались на прикладі застосування методу лінійної апроксимації у лабораторній роботі з фізики.

У подальшому ми плануємо досліджувати інші види апроксимації, такі як логарифмічна чи експоненціальна, з метою їх ефективного впровадження у навчальний процес.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Іщенко Р. М. Викладання фізики в технічних університетах України на сучасному етапі. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ: НТУ, 2017. № 1. С. 147–153.
2. Янченко С.Я. Апроксимація. Велика українська енциклопедія. URL: <https://vue.gov.ua/Апроксимація> (дата звернення: 13.02.2025).
3. Крилик Л. В., Богач І. В., Прокопова М. О. Навчальна математика. Інтерполяція та апроксимація табличних даних: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2013. 111 с.
4. Чорний О. П., Титюк В. К., Істоміна Н. М., Власенко В.А. Математичні методи моделювання: навч. посіб. Кременчук: ПП Щербатих О. В., 2016. 234 с.
5. Мороз О. Модель, моделювання. *Філософський енциклопедичний словник* / В. І. Шинкарук (гол. редкол.) та ін. Київ: Абрис, 2002. С. 391–392.
6. Несмашний Є.О., Ткаченко Г.І., Герасимова К.В. Використання чисельних методів моделювання фізичних процесів у закладах вищої освіти. *Вісник Криворізького національного університету*. Кривий Ріг, 2019. № 48. С. 88–94. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vktu_2019_48_19
7. Лопатинський І.Є., Зачек І.Р., Ільчук Г. А., Романишин Б. М. Фізика для інженерів: підр. Львів: Львівська політехніка, 2009. 385 с.
8. Лисікова К.О., Цибульник С.О., Апроксимація функцій методом найменших квадратів / *Вісник інженерної академії України*. Київ, 2017. № 1. С. 106–110.
9. Клепко В. Ю., Голець В. Л. Вища математика в прикладах і задачах: навч. посіб. Київ: Центр учбової літератури, 2009. 594 с.

10. Косуліна Н. Г. Метод найменших квадратів: навч.-метод. посіб. Харків: ХНТУСГ, 2020. 25 с.

REFERENCES:

1. Ishchenko, R. M. (2017). Vykladannia fizyky v tekhnichnykh universytetakh Ukrainy na suchasnomu etapi [Teaching physics in technical universities of Ukraine at the modern stage]. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu – Bulletin of the National Transport University*, 1, 147–153. [in Ukrainian].
2. Yanchenko, S. Ya. Approximation. Velyka ukrayinska entsyklopediya [Great Ukrainian Encyclopedia]. Retrieved from <https://vue.gov.ua/Апроксимація> [in Ukrainian].
3. Krylyk, L. V., Bohach, I. V., & Prokopova, M. O. (2013). Navchalna matematyka. Interpolyatsiya ta aproksymatsiya tablychnykh danykh [Educational mathematics. Interpolation and approximation of tabular data]. VNTU, 111. [in Ukrainian].
4. Chorny, O.P., Tytyuk, V. K., Istomina, N. M. & Vlasenko, V. A. (2016). Matematychni metody modelyuvannya [Mathematical modeling methods]. PP Shcherbatykh O. V., 234. [in Ukrainian].
5. Moroz, O. (2002). Model, modelyuvannya. *Filosofskyi entsyklopedychnyi slovnyk* / V. I. Shynkaruk (hol. redkol.) ta in. [Model, modeling. In V. I. Shynkaruk (Ed.), *Philosophical encyclopedic dictionary*]. Abris, 391–392. [in Ukrainian].
6. Nesmashnyy, Ye.O., Tkachenko, H.I. & Herasymova, K.V. (2019). Vykorystannya chyselnykh metodiv modelyuvannya fizychnykh protsesiv u zakladakh vyshchoyi osvity [Application of numerical methods for modeling physical processes in higher education institutions.]. *Visnyk Kryvoriz'koho natsional'noho universytetu – Bulletin of Kryvyi Rih National University*, 48, 88–94. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vktu_2019_48_19 [in Ukrainian].
7. Lopatynskyi, I. Ie., Zachek, I.R., Ilchuk, H. A. & Romanyshyn, B. M. (2009). Fizyka dlia inzheneriv [Physics for engineers]. Lvivska politekhnika, 385. [in Ukrainian].
8. Lysikova, K.O. & Tsybulnyk, S.O. (2017) Aproksymatsiya funktsiy metodom naymenshykh kvadrativ [Approximation of functions by the method of least squares] / *Visnyk inzhenernoyi akademiyi Ukrayiny – Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine*, 1, 106–110. [in Ukrainian].
9. Klepko, V. Yu., & Holets, V. L. (2009). Vyshcha matematyka v prykladakh i zadachakh [Higher mathematics in examples and problems]. *Tsentr uchbovoyi literatury – Center of Educational Literature*, 594. [in Ukrainian].
10. Kosulina N. H. (2020). Metod naymenshykh kvadrativ [The method of least squares]. KhNTUSH, 25. [in Ukrainian].

УДК 378.147.09.33-027.22

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-2>

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, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1152-1536>

Микола ГОЛОВІН

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4516-4677>

Оксана ОСТРЕЙ

інженер з комп'ютерних систем відділу технічних засобів навчання «Центру інноваційних технологій та комп'ютерного тестування», Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1174-8367>

Григорій КОБЕЛЬ

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3774-0032>

Олександр МАРТИНЮК

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

ORCID ID: <http://orcid.org/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, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9088-3825>

SCOPUS AUTHOR ID: 36245422900

Бібліографічний опис статті: Головіна, Н., Головін, М., Острей, О., Кобель, Г., Мартинюк, О., Мирончук, Г. (2021). До питання організації та проведення навчальної практики «Освітні проектні технології». *Фізика та освітні технології*, 1, 10–19, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-2>

ДО ПИТАННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ТА ПРОВЕДЕННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ПРАКТИКИ «ОСВІТНІ ПРОЕКТНІ ТЕХНОЛОГІЇ»

Навчальні практики є одним з ключових видів діяльності здобувачів освіти. Під час проходження практики здобувачі освіти отримують практичний досвід майбутньої професії. Авторами розкрито сенс навчальної практики «Освітні проектні технології» та показано її місце у підготовці учителів інформатики, фізики закладу загальної середньої освіти. Розглянуто можливі види діяльності здобувачів освіти під час проходження практики. Практична робота здобувачів освіти педагогічного напрямку є особливо корисною тому, що дає їм змогу

одночасно перебувати у двох статусах: учня та учителя. Проектні технології є ефективним інструментом для розвитку загальнокультурної, інформаційно-комунікаційної, комунікативної, міждисциплінарної, соціальної та проектно-технологічної компетентностей здобувачів освіти.

У роботі подано ментальну карту, що ілюструє поняття проекту, освітнього проекту, проектних технологій, характеристик та класифікації освітнього проекту. Розглянуто етапи реалізації проекту. Деталізовано етап планування, що є фундаментом успішної реалізації будь-якого проекту. Наголошено, що виконання навчального проекту базується на раніше здобутих первинних знаннях, пошуково-дослідницькій роботі. Кінцевий результат проектної діяльності – доповідь з представленням створеного ІТ продукту, що реалізується засобами освоєних інформаційних технологій (текстовий файл, презентація, програмний код, відеоролик, сайт тощо).

Для апробації виконання навчальних проектів за шкільною програмою запропоновано: розробку індивідуального проекту «Наш помічник комп'ютер» з інформатики для 5 класу; розробку індивідуального проекту «Експериментальна задача з фізики» з фізики для 7 класу; розробку колективного проекту «Купуємо комп'ютери для школи». Вказано, що повинно бути результатом роботи кожного проекту.

Ключові слова: навчальна практика, проекти, освітні проекти, проектні технології.

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, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1152-1536>

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, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4516-4677>

Oksana OSTREI

Computer Systems Engineer of the Technical Teaching Aids Department of the «Center for Innovative Technologies and Computer Testing», Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1174-8367>

Hryhoriy KOBEL

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3774-0032>

Oleksandr MARTYNIUK

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

ORCID ID: <http://orcid.org/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, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9088-3825>

SCOPUS AUTHOR ID: 36245422900

To cite this article: Holovina, N., Holovin, M., Ostrei, O., Kobel, H., Martyniuk, O., Myronchuk, G. (2021). Do pytannia orhanizatsii ta provedennia navchalnoi praktyky «Osvitni proektni tekhnolohii» [On the issue of organization and conduct of education practice «Educational project technologies»]. *Physics and Educational Technology*, 1, 10–19, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-2>

ON THE ISSUE OF ORGANIZATION AND CONDUCT OF EDUCATION PRACTICE “EDUCATIONAL PROJECT TECHNOLOGIES”

Educational practices are one of the key types of activity of education seekers. During the practice, education seekers gain practical experience of their future profession. The authors reveal the meaning of the educational practice "Educational Project Technologies" and show its place in the training of teachers of computer science and physics of a general secondary education institution. Possible types of activity of education seekers during the practice are considered. Practical work of education seekers of pedagogical direction is especially useful because it allows them to be in two statuses at the same time: student and teacher. Project technologies are an effective tool for the development of general cultural, information and communication, communicative, interdisciplinary, social and project and technological competencies of education seekers.

The paper presents a mental map illustrating the concepts of a project, educational project, project technologies, characteristics and classification of an educational project. The stages of project implementation are considered. The planning stage, which is the foundation of the successful implementation of any project, is detailed. It is emphasized that the implementation of an educational project is based on previously acquired primary knowledge, search and research work. The final result of project activity is a report with a presentation of the created IT product, which is implemented using the means of mastered information technologies (text file, presentation, program code, video, website, etc.).

To test the implementation of educational projects according to the school curriculum, the following are proposed: development of an individual project "Our Assistant Computer" in computer science for grade 5; development of an individual project "Experimental Problem in Physics" in physics for grade 7; development of a collective project "We Buy Computers for School". It is indicated what should be the result of each project.

Key words: educational practice, projects, educational projects, project technologies.

Актуальність теми. Розробникам освітньо-професійної програми (ОПП) «Середня освіта. Фізика» у ВНУ імені Лесі Українки видається актуальним поєднання фізики та інформатики для учителя ЗЗСО у сенсі придатності до працевлаштування. Це обумовлено сучасними потребами ринку освітніх послуг:

- відповідно до вимог Нової української школи з 2027-2028 навчального року почнеться реалізація реформи старшої профільної школи;
- територіальними особливостями Волинської області, де більшість сільських шкіл є малокомплектними.

Готовність до професійної діяльності та здатність до саморозвитку і самореалізації забезпечується у ОПП блоком практик (24 кредити ЄКТС). Однією з навчальних практик запропоновано «Освітні проєктні технології» (Волинський національний університет імені Лесі Українки, 2024). Проєктне навчання сприяє розвитку творчого та критичного мислення, самостійності й уміння працювати в команді. Використання проєктних технологій дозволяє створювати середовище, де здобувачі освіти отримують не лише базові компетентності, а й реалізують власні ідеї, навчаючись

через практичну діяльність, засвоюючи складні концепції у доступній та цікавій формі. Метод проєктів активно впроваджується у всі шкільні предмети і інформатику та фізику, зокрема. Тому впровадження навчальної практики «Освітні проєктні технології» видається актуальним, потрібним і на часі.

Завдяки проєктам здобувачі освіти розвивають такі важливі навички:

- *самостійність* – планують роботу, шукають інформацію, ухвалюють рішення;
- *креативність* – генерують ідеї, створюють оригінальні продукти;
- *комунікативність* – працюють у команді, презентують результати;
- *критичне мислення* – аналізують інформацію, оцінюють результати.

Для майбутніх учителів фізики та інформатики оволодіння проєктними технологіями є особливо важливим. Виступаючи у ролі учня, створюють учнівські проєкти, передбачені навчальними програмами і використовують набутий досвід для розробки власних навчально-методичних матеріалів.

Метою статті є дослідження питань організації та проведення навчальної практики «Освітні проєктні технології» для здобувачів

освітнього рівня бакалавр, майбутніх учителів фізики та інформатики.

Завдання:

- розкрити зміст навчальної практики та показати її місце у підготовці фахівців за вказаним профілем;
- розглянути можливі види діяльності здобувачів освіти під час проходження навчальної практики.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Відразу відмітимо, що питанням проєктів, проєктних технологій присвячено багато статей, монографій, посібників, матеріалів із освітнього проєкту «На урок», національної освітньої платформи «Всеосвіта» та інших методичних порталів. У них детально розглянуто і термінологію, і теоретичні засади використання у загальному, у межах освітньої діяльності ЗЗСО, закладів професійної (професійно-технічної) освіти, вищої освіти. У посібнику (Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2014) розкриваються теоретико-практичні аспекти інноваційних соціально-педагогічних технологій проєктування розвитку обдарованості в практиці роботи загальноосвітніх навчальних закладів. Описуються впровадження проєктної педагогіки в практику навчального закладу, запропоновано рекомендації щодо соціально-педагогічного проєктування навчально-виховного процесу для управлінців, адміністрації та педагогічних працівників загальноосвітніх навчальних закладів.

У (Залозна, 2022) подана методика використання проєктних технологій в школі, як на уроках так і у виховній роботі. Наведені конкретні приклади проєктів, з планами роботи та порадами, щодо їх реалізації.

У монографії (Кулалаєва, 2019) розкрито суть і особливості проєктного навчання у закладах професійної (професійно-технічної) освіти. Проаналізовано зарубіжний і вітчизняний досвід проєктного навчання, оприлюднено концепцію проєктного навчання у закладах професійної (професійно-технічної) освіти. Визначено основні підходи і принципи, дидактичні й соціально-психологічні умови проєктного навчання та основи управління проєктною діяльністю майбутніх кваліфікованих робітників. Охарактеризовано готовність учнів до проєктної діяльності та готовність педагогічних працівників до розроблення і застосування проєктних

технологій професійного навчання. Наведено методики організації проєктного навчання та розроблення проєктних технологій для професійної підготовки майбутніх кваліфікованих робітників аграрної, будівельної та автотранспортної галузей.

У статті (Лепко, 2010) проаналізовано процес педагогічного проєктування в навчальній діяльності, розкрито вимоги до викладача як суб'єкта проєктування, подано загальну характеристику власного досвіду роботи з проєктами на заняттях з української мови як іноземної.

У статті (Мацюк, 2020) описано формування у студентів-фізиків педагогічних університетів готовності до організації дослідницької роботи з учнями. І підкреслено: «Інноваційні процеси у системі освіти вимагають принципових змін у методиці підготовки вчителів-предметників для шкіл нового типу».

Метою статті (Донець, 2015) було окреслити умови формування методичних підходів до підготовки вчителів фізики та реалізації навчальних проєктів у шкільному курсі фізики. Констатується, що метод навчальних проєктів не повинен суперечити класно-урочній системі навчання. Наголошується, що цей метод є важливим компонентом освіти і повинен використовуватися в різних видах навчально-виховної діяльності учнів.

У публікації (Головіна, 2024) підкреслено, що у Тернопільському національному педагогічному університеті кілька років поспіль проводяться міжфакультетські навчально-методичні семінари, які об'єднані проблематикою підвищення ролі та значення практик у підготовці сучасного фахівця. Цей захід може слугувати прикладом системного джерела для організації та покращення практичної підготовки студентів університету, а матеріали (Тернопільський національний педагогічний університет, 2020) – джерелом сучасного бачення та специфіки організації та проведення практик. Але питання організації та проведення практики, пов'язаної із проєктними технологіями у цих матеріалах не розглянуто.

Тобто дослідження питань організації та проведення саме навчальної практики «Освітні проєктні технології» для здобувачів освітнього рівня бакалавр, майбутніх учителів фізики та інформатики залишається актуальним та не достатньо висвітленим.

Виклад основного матеріалу дослідження

Практика «Освітні проектні технології» покликана допомогти здобувачам освіти, які навчаються на освітньому рівні підготовки *бакалаврів*, не лише освоїти теоретичні основи проектних технологій, а й набуті практичних навичок їх застосування в освітньому процесі.

Метою практики «Освітні проектні технології» є дослідження особливостей впровадження навчальних проектних технологій у викладанні інформатики для учнів середньої школи, починаючи з 5 класу в умовах НУШ, та при викладанні фізики, починаючи з 7 класу. Проектна діяльність на уроках інформатики та фізики розглядається як інструмент, який здатен не лише покращити засвоєння матеріалу, а й розвинути важливі навички, необхідні для успішної соціалізації здобувачів освіти. Здобувачі освіти – бакалаври, майбутні учителі фізики та інформатики занурюються у метод проектів: самі пробують створювати індивідуальні учнівські проекти для відповідного класу та реалізують групові проекти, відповідно до різних змістових ліній вивчення інформатики та реалізації методу проектів з фізики.

Через навчальну практику проектні технології стануть ефективним інструментом для розвитку творчих, комунікативних та інших ключових компетентностей здобувачів освіти. Поняття освітнього проекту та проектних технологій проілюстровано на ментальній карті, створеній авторами рис. 1.

Проектна діяльність передбачає проходження кількох послідовних етапів, кожен з яких має свої особливості та вимагає певних дій від учасників проекту. Після вибору теми необхідно скласти детальний план роботи.

План реалізації проекту включає:

- формулювання мети та завдань проекту (чітко визначити, чого хочуть досягти ЗО в результаті виконання проекту);
- вибір способу представлення результатів виконання проекту (усна доповідь, файл, програмний продукт);
- розподіл ролей і обов'язків (визначити, хто і за що відповідає в команді);
- розробка графіка виконання робіт (встановити конкретні терміни виконання кожного етапу проекту);
- визначення необхідних ресурсів (визначити, які матеріали, обладнання та інформаційні джерела потрібні для виконання проекту).

Розглянемо детально етап планування, що є фундаментом успішної реалізації будь-якого проекту, особливо в шкільному середовищі. Саме на цьому етапі закладається стратегія досягнення мети, розподіляються ролі, визначаються ресурси та створюється чіткий план дій, адже без детального плану легко загубитися в множині завдань та ідей. По-перше, відбувається структурування процесу, що допомагає розподілити роботу за часом та визначити пріоритети складових завдань. По-друге, можна продумати оптимізацію ресурсів. Ресурси: час, матеріали та людські, завжди обмежені. План допомагає раціонально використовувати всі наявні ресурси, уникнути зайвих витрат та забезпечити ефективну роботу. По-третє, прокачуємо soft-skills, адже процес планування розвиває такі важливі навички, як:

- планування та організація, коли здобувачі освіти (ЗО) вчаться ставити цілі, розробляти стратегії та складати детальні плани;
- розподіл відповідальності, коли ЗО навчаються працювати в команді, розподіляти завдання та відповідати за виконання своїх обов'язків;
- прийняття рішень, коли на етапі планування ЗО стикаються з необхідністю приймати рішення, оцінювати різні варіанти та обирати оптимальний.

По-четверте, створюється можливість до збільшення мотивації – чіткий план з конкретними завданнями та термінами виконання підвищує мотивацію виконавців. Вони бачать прогрес своєї роботи та розуміють, що рухаються до поставленої мети. По-п'яте, добре продуманий план допомагає передбачити можливі труднощі та розробити заходи щодо їх подолання. Це значно зменшує ризик провалу проекту. Тому, приділяючи достатню увагу плануванню, ЗО розвивають не тільки ключові компетентності, а й важливі навички для майбутнього життя.

Кінцевий результат проектної діяльності – доповідь з представленням створеного ІТ продукту (текстовий файл, презентація, програмний код, відеоролик, сайт тощо). Виконання навчального проекту базується на раніше здобутих первинних знаннях, пошуково-дослідницькій роботі, реалізується засобами освоєних інформаційних технологій.

Навчальна практика «Освітні проектні технології» передбачає роботу над шкільними



Рис. 1. Ментальна карта, що ілюструє поняття проекту, освітнього проекту, проектних технологій, характеристик та класифікації освітнього проекту за (Возна, 2019)

проектами за навчальними програмами для учнів 5-11 класів ЗЗСО. Студенти, з однієї сторони, виконуючи завдання практики – створюють проекти, а з іншої, мають можливість вивчити особливості проектної діяльності як із сторони учня так і із сторони учителя. Таким чином, фіксуються проблемні місця, аналізуються фактори, які сприяють успішній реалізації проекту. ЗО на власному прикладі здійснюють усі етапи проекту, з урахуванням часових

рамоч, і відповідальністю за результати роботи у групі. Зупинимось власне на тих окремих індивідуальних та колективних проектах, які вибрані нами для організації практики.

Для апробації виконання навчальних проектів за шкільною програмою з інформатики для 5 класу (Ривкінд, 2021) пропонуємо розробку індивідуального проекту «Наш помічник комп'ютер». Вчитель повинен враховувати – для молодших підлітків важливо, щоб

проектна діяльність була структурованою та підтримувалася чіткими вказівками і допомогою з боку наставника. Поступове підведення учнів до самостійності через добре структуровані завдання є важливим елементом проектної діяльності для учнів цього віку. Здобуті раніше навички дозволяють очікувати результатом роботи розробку графічного продукту (файлу), нескладної за форматуванням та змістом текстової брошури; розробку у Скретч програми з використанням лінійних алгоритмів та розгалуження, (Савченко, 2019).

Індивідуальний проєкт передбачає отримання унікальної конкретної теми для кожного учня класу, наприклад:

1. Наш помічник комп'ютер в медицині.
2. Наш помічник комп'ютер у вивченні іноземних мов.
3. Наш помічник комп'ютер в музиці.
4. Наш помічник комп'ютер при вирощуванні рослин.
5. Наш помічник комп'ютер в догляді за тваринами.
6. Наш помічник комп'ютер в автотранспорті.
7. Наш помічник комп'ютер в авіатранспорті.
8. Наш помічник комп'ютер в харчуванні.
9. Наш помічник комп'ютер у занятті спортом.

Важливо, щоб теми були реалістичними і мали практичну значущість, адже це дозволяє учням відчувати, що інформатика може бути корисною у реальному житті.

Для апробації виконання навчальних проєктів за шкільною програмою для 7 класу з фізики (Максимович, 2023) пропонуємо розробку індивідуального проєкту «Експериментальна задача з фізики». Експериментальними називаємо такі задачі, постановка і розв'язання яких вимагають організації та проведення фізичного експерименту, у ході якого ЗО одержують необхідні для розв'язання задачі значення фізичних величин або ж експериментально перевіряють попередньо зроблені розрахунки. (Давиденко, 1997).

Для виконання проєкту, з врахуванням порад відносно розв'язування експериментальних задач (Кобель, 2023), ЗО необхідно:

- вибрати одну з експериментальних задач;
- описати фізичні явища та відповідну модель експерименту, вивести розрахункову формулу;

- скласти план вимірювань, здійснити експеримент, провести вимірювання;
- виконати обчислення шуканої величини; при потребі побудувати графічні залежності;
- обчислити похибки;
- вказати шляхи підвищення точності експерименту;
- здійснити фото та відео фіксацію;
- підготувати один із способів представлення результатів роботи (текстовий документ, файл презентації, відеоролик з озвученням).

Можна запропонувати на вибір, наприклад, такі задачі:

1. Вивчення залежності сили тертя ковзання від роду тертьових поверхонь.
2. Вивчення залежності сили тертя ковзання від сили тиску і незалежності від площі тертьових поверхонь.
3. Вимірювання ваги тіла за допомогою важеля.
4. Обчислення виграшу в силі інструментів, в яких застосовано важіль.
5. Вимірювання модулів кутової і лінійної швидкостей тіла при рівномірному русі по колу.
6. Спостереження залежності модулів сил натягу ниток від кута між ними при сталій рівнодійній силі.
7. З'ясування умов рівноваги тіла, що має вісь обертання, при дії на нього кількох сил.
8. Спостереження зміни модуля ваги тіла, що рухається з прискоренням.
9. Вивчення закону збереження імпульсу при пружному зіткненні тіл.

Приклад умови задачі:

1. Визначення об'єму тіла за його густиною і масою

Прилади й матеріали:

1. терези навчальні, 2) гирі, 3) циліндр вимірювальний (мензурка) з водою, 4) тіло неправильної форми, нитка, 5) таблиця густин.

Порядок виконання роботи:

- Запишіть назву речовини, з якого складаються тіла неправильної форми.
- Знайдіть у таблиці значення густини цієї речовини.
- Виміряйте масу тіла за допомогою терезів.
- Обчисліть об'єм тіла.
- Перевірте результат обчислення об'єму тіла за допомогою мензурки.

Такий проєкт розвиватиме дослідницькі навички та підвищуватиме інтерес до фізики, що є особливо важливим та цінним на сьогодні.

Для апробації виконання навчальних проєктів за шкільною програмою з інформатики для

5 класу (Ривкінд, 2021) пропонуємо розробку колективного проєкту «Купуємо комп'ютери для школи». Приклад завдання на реалізацію цього проєкту:

Розробка колективного проєкту «Купуємо комп'ютери для школи» Рекомендації до виконання: Виконуючи груповий проєкт, вам потрібно спочатку разом спланувати вашу діяльність, враховуючи ідеї та пропозиції учасників/учасниць групи, обрати певні рішення та розподілити роботу між вами. Ролі: директор; економіст (бухгалтер); зауч, діловод і бібліотекар; учителі інформатики; зав кафедри. Директор: розписує ролі та тайм менеджмент проєкту (важливо відразу ролі і час виконання). Зауч, діловод і бібліотекар: готують текстовий документ з пропозиціями переліку програмного забезпечення, комп'ютерів, технічного обладнання (камери, сканер, принтер і т.д.) для школи. Учителі інформатики: готують текстовий документ виписують потрібне програмне забезпечення з навчальних програм і вибирають відповідно до нього апаратне забезпечення (блоки, монітори). Зав кафедри: формує єдиний документ із зазначеною кількістю техніки у кожний кабінет інформатики. Економіст (бухгалтер): готують текстовий документ вивчають ціни в різних(5) магазинах, шукають мінімальні ціни в магазинах на складові. Складає кошторис. Директор: вибирає що і де буде купувати, перевіряє оптимальність варіантів. Приймає рішення (текстовий документ що де купувати).

Слід зауважити, що проєктна діяльність з кожним класом ускладнюється, як у плані реалізації проєкту так і у рівні складності

представлення отриманих результатів. Програма як з інформатики, так і з фізики з кожним наступним класом передбачає використання спочатку однієї інформаційної технології реалізації і теми вивченого матеріалу, а далі кількох технологій і об'єднання тем.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Досліджено питання організації та проведення навчальної практики «Освітні проєктні технології» для здобувачів освітнього рівня бакалавр, майбутніх учителів фізики та інформатики. Розкрито зміст навчальної практики та показано її місце у підготовці фахівців за вказаним профілем.

Для апробації виконання навчальних проєктів за шкільною програмою запропоновано: розробку індивідуального проєкту «Наш помічник комп'ютер» з інформатики для 5 класу; розробку індивідуального проєкту «Експериментальна задача з фізики» з фізики для 7 класу; розробку колективного проєкту «Купуємо комп'ютери для школи». Вказано, що повинно бути результатом роботи кожного проєкту.

Апробація запропонованого варіанту дасть можливість зробити оцінку правильності вибору напрямку проведення цієї практики; рефлексія здобувачів освіти дасть можливість виокремити її результати та визначити можливі напрямки подальшого розвитку.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Середня освіта. Фізика. Освітньо-професійна програма. Луцьк, 2024. URL: https://vnu-taskid841251.s3.eu-north-1.amazonaws.com/s3fs-public/Educational%20programs/Document%20programs/opp_2024-3.pdf (дата звернення: 10.02.2024).
2. Технології проєктування в практиці роботи загальноосвітнього навчального закладу: теоретико-практичний аспект: Посібник. К.: Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2014. 336 с. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/32309414.pdf> (дата звернення: 20.02.2024).
3. Залозна С.В. Проєктні технології у школі. *На урок. Освітній проєкт* URL: <https://naurok.com.ua/metodika-vikoristannya-proektnih-tehnologiy-proekti-v-shkoli-288319.html> 25 березня 2022 (дата звернення: 20.02.2024).
4. Теорія і практика проєктного навчання у професійно-технічних навчальних закладах. Монографія / В.М. Аніщенко, М.В. Артюшина, Т.М. Герлянд, Н.В. Кулалаєва, Г.М. Романова, М.М. Шимановський та ін.; за заг. ред. Н.В. Кулалаєвої. Житомир: Полісся, 2019. 208 с. URL: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/718498/1/%D0%9F%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0%201.pdf> (дата звернення: 20.02.2024).
5. Лепко Г.В. Метод проєктування в навчальному процесі», *Вісник ВПН*, вип. 1, С. 161–163, Листоп. 2010. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1380> (дата звернення: 20.02.2024).
6. Мацюк В.М. Формування у студентів-фізиків педагогічних університетів готовності до організації дослідницької роботи з учнями / *Нові підходи до організації та ефективного проведення практик в кризових умовах: Матеріали міжфакультетського навчально-методичного семінару*. Тернопіль: Вектор, 2020. 60 с.
7. Донець Н.В., Трифонова О.М., Садовий М.І. Підготовка вчителів фізики до реалізації навчальних проєктів у шкільному курсі фізики. *Наукові записки*. Кіровоград: РВВ КДПУ імені В. Винниченка 2015. С. 45–50.
8. Головіна Н.А., Головін М.Б., Калугіна І.М. Психолого-педагогічна навчальна практика – перший крок здобувача освіти для реалізації себе як педагога. *«Наукові записки. Серія: Педагогічні науки»*. Кропивницький: Цен-

тральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка, № 212 (2024). С. 85–94. URL: <https://pednauk.cusu.edu.ua/index.php/pednauk/article/view/1710/1678> (дата звернення: 20.02.2024).

9. Нові підходи до організації та ефективного проведення практик в кризових умовах: Матеріали міжфакультет. навч.-метод. семінару. Тернопіль: Вектор, 2020. 60 с. URL: <http://dspace.tnpu.edu.ua/handle/123456789/23791> (дата звернення: 20.02.2024).

10. Возна З.О. Організація проєктної діяльності учнів : Навчально-методичний посібник для студентів освітнього ступеня «Магістр» денної та заочної форми навчання. Умань: «ВПЦ» Візаві, 2019.

11. Модельна навчальна програма «Інформатика. 5-6 класи» для закладів загальної середньої освіти (автори Ривкінд Й.Я., Лисенко Т.І., Чернікова Л.А., Шакотько В.В.) URL: <https://informatik.pp.ua/kabinet/programi/5-6-klasy/modelna-programa-informatyka-5-6-klasy-ryvkind/> (дата звернення: 20.02.2024).

12. Типова освітня програма, розроблена під керівництвом Савченко О.Я. 3-4 клас НУШ. URL: <https://drive.google.com/file/d/1eOoYbHQJ8AqHVbxWXCHyNwItHZupDAjh/view> (дата звернення: 20.02.2024).

13. Модельна навчальна програма фізика 7-9 класи автори: Максимович З.Ю., Білик М.М., Варениця Л.В., Коваль Г.С., Микитеєк О.М., Ординович М.Б., Созанський А.В., Шевців В.Ф. URL: <https://mon.gov.ua/static-objects/mon/sites/1/zagalna%20serednya/Navchalni.prohramy/2023/Model.navch.prohr.5-9.klas/Fizyka-2023/Fizyka.7-9.kl.Maksymovych.ta.in.20.02.2023.pdf> (дата звернення: 20.02.2024).

14. Давиденко (Давидьон) А.А. Експериментальні задачі з фізики для учнів 7 – 9 класу: Посібник для вчителів фізики: Чернігів, 1997. 44 с.

15. Кобель Г.П., Савош В.О. Експериментальний тур третього етапу LVIII та LIX Всеукраїнських олімпіад, з фізики / *Педагогічний пошук* № 4 (120). 2023. С. 71–73.

REFERENCES:

1. Serednia osvita. Fyzika. Osvitno-profesiina prohrama. Lutsk, 2024. [Secondary education. Physics. Educational and professional program. Lutsk, 2024]. Retrieved from: https://vnu-taskid841251.s3.eu-north-1.amazonaws.com/s3fs-public/Educational%20programs/Document%20programs/opp_2024-3.pdf (access date: 10.02.2024) [in Ukrainian].

2. Tekhnologii proektuvannia v praktytsi roboty zahalnoosvitnoho navchalnoho zakladu: teoretyko-praktychnyi aspekt: Posibnyk. K.: Instytut obdarovanoi dytyny NAPN Ukrainy, 2014. 336 s. [Design technologies in the practice of work of general educational institution: theoretical and practical aspect: Manual. K.: Institute of gifted children of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2014. 336 p]. Retrieved from: <https://core.ac.uk/download/pdf/32309414.pdf> (access date: 20.02.2024). [in Ukrainian].

3. Zalozna, S.V. Proektni tekhnologii u shkoli. [Project technologies in school]. *Na urok. Osvitnii poekt* 25 bereznia 2022. Retrieved from: <https://naurok.com.ua/metodika-vikoristannya-proektnih-tehnologiy-proekti-v-shkoli-288319.html> March 25, 2022 (access date: 02/20/2024) [in Ukrainian].

4. Teoriia i praktyka proektnoho navchannia u profesiino-tekhnichnykh navchalnykh zakladakh [Theory and practice of project learning in vocational educational institutions]. Monohrafiia / V.M. Anishchenko, M.V. Artiushyna, T.M. Herliand, N.V. Kulalaieva, H.M. Romanova, M.M. Shymanovskiy ta in.; za zah. red. N.V. Kulalaievoi. Zhytomyr: Polissia, 2019. 208 s. Retrieved from: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/718498/1/%D0%9F%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0%201.pdf> (access date: 20.02.2024) [in Ukrainian].

5. Lepko, H.V. (2010). Metod proektuvannia v navchalnomu protsesi, [Design Method in the Educational Process]. *Visnyk VPI – Bulletin of the VPI*, vol. 1, pp. 161–163. Retrieved from: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1380> (access date: 20.02.2024) [in Ukrainian].

6. Matsiuk, V.M. (2020). Formuvannia u studentiv-fyzikiv pedahohichnykh universytetiv hotovnosti do orhanizatsii doslidnytskoi roboty z uchniamy [Formation of readiness of physics students of pedagogical universities to organize research work with students]. *Novi pidkhody do orhanizatsii ta efektyvnoho provedennia praktyk v kryzovykh umovakh: Materialy mizhfakultetskoho navchalno-metodychnoho seminaru – New approaches to organizing and effectively conducting practices in crisis conditions: Materials of the interfaculty educational and methodological seminar*. Ternopil: Vektor, 60 s. [in Ukrainian].

7. Donetsk, N.V., Tryfonova, O.M., & Sadovyi, M.I. (2015). Pidhotovka vchyteliv fizyky do realizatsii navchalnykh proektiv u shkilnomu kursy fizyky. [Training physics teachers to implement educational projects in the school physics course]. *Naukovi zapysky – Scientific notes*. Kirovograd: RVV KDPU named after V. Vynnychenko. P. 45–50. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/53035463.pdf>. [in Ukrainian].

8. Holovina, N.A., Holovin, M.B., & Kaluhina, I.M. (2024). Psykholoho-pedahohichna navchalna praktyka – pershyi krok zdobuvacha osvity dla realizatsii sebe yak pedahoha [Psychological and pedagogical educational practice is the first step of an education seeker to realize himself as a teacher]. *Naukovi zapysky. Seriya: Pedahohichni nauky – Scientific notes. Series: Pedagogical sciences*. Kropyvnytskyi: Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State University, No.

212 (2024). P. 85–94. Retrieved from: <https://pednauk.cusu.edu.ua/index.php/pednauk/article/view/1710/1678> (access date: 02/20/2024). [in Ukrainian].

9. Novi pidkhody do orhanizatsii ta efektyvnoho provedennia praktyk v kryzovykh umovakh: [New approaches to organizing and effectively conducting practices in crisis conditions]: Materialy mizhfakultet. navch.-metod. seminaru. Ternopil: Vektor, 2020. 60 s. (data zvernennia: 20.02.2024). [Materials of the interfaculty teaching-methodical seminar. Ternopil: Vector, 2020. 60 p]. Retrieved from: <http://dspace.tnpu.edu.ua/handle/123456789/23791> (access date: 02/20/2024) [in Ukrainian].

10. Vozna, Z.O. (2019). Orhanizatsiia proiektnoi diialnosti uchniv: [Organization of student project activities]: Navchalno-metodychnyi posibnyk dlia studentiv osvithnoho stupenia «Mahistr» dennoi ta zaochnoi formy navchannia – Vizavi Educational and methodological manual for students of the Master's degree of full-time and part-time study. Uman: "VPC" Visavi. [in Ukrainian].

11. Modelna navchalna prohrama «Informatyka. 5-6 klasy» dlia zakladiv zahalnoi serednoi osvity [Model curriculum "Informatics. Grades 5-6" for secondary education institutions] (avtory Ryvkind Y.Ia., Lysenko T.I., Chernikova L.A., Shakotko V.V.) (data zvernennia: 20.02.2024). Retrieved from: <https://informatik.pp.ua/kabinet/programi/5-6-klasy/modelna-prohrama-informatyka-5-6-klasy-ryvkind/> (access date: 02/20/2024). [in Ukrainian].

12. Typova osvithnia prohrama, rozroblena pid kerivnytstvom Savchenko O.Ia. 3-4 klas NUSh [Typical educational program developed under the leadership of Savchenko O.Ya. Grades 3-4 of the National Secondary School.] (data zvernennia: 20.02.2024). Retrieved from: <https://drive.google.com/file/d/1eOoYbHQJ8AqHVbxWXCHyNwItHZupDAjh/view> (access date: 02/20/2024) [in Ukrainian].

13. Modelna navchalna prohrama fizyka 7-9 klasy [Model curriculum for physics grades 7-9] avtory: Maksymovych Z.Iu., Bilyk M.M., Varenysia L.V., Koval H.S., Mykyteiek O.M., Ordynovych M.B., Sozanskyi A.V., Shevtsiv V.F. Retrieved from: <https://mon.gov.ua/static-objects/mon/sites/1/zagalna%20serednya/Navchalni.prohramy/2023/Model.navch.prohr.5-9.klas/Fizyka-2023/Fizyka.7-9.kl.Maksymovych.ta.in.20.02.2023.pdf> (access date: 20.02.2024). [in Ukrainian].

14. Davydenko, (Davydon) A.A. (1997). Eksperymentalni zadachi z fizyky dlia uchniv 7 – 9 klasu: [Experimental problems in physics for students of grades 7-9:] Posibnyk dlia vchyteliv fizyky. Chernihiv, 1997. 44 p. [in Ukrainian].

15. Kobel, H.P., & Savosh, V.O. (2023). Eksperymentalnyi tur tretoho etapu LVIII ta LIX Vseukrainskykh olimpiad, z fizyky [Experimental round of the third stage of the LVIII and LIX All-Ukrainian Olympiads in physics] / *Pedahohichni poshuk – Pedagogical search*. № 4 (120). P.71–73 [in Ukrainian].

УДК 378.147:621.3

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-3>

Дмитро ІВАНЮК

аспірант навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0807-2140>

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, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3581-8852>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422272900

Бібліографічний опис статті: Іванюк, Д., Кевшин, А. (2025). Оптичні властивості кристалів $(\text{TiGaSe}_2)_{1-x}(\text{SnSe}_2)_x$ ($x=0,05; 0,1$). *Фізика та освітні технології*, 1, 20–30, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-3>

ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КРИСТАЛІВ $(\text{TiGaSe}_2)_{1-x}(\text{SnSe}_2)_x$ ($X=0,05; 0,1$)

Розвиток сучасних технологій потребує пошуку нових перспективних матеріалів, як основного джерела розширення та покращення функціональних можливостей приладів напівпровідникової електроніки. Науковою основою такого пошуку є вивчення фізичних властивостей багатокомпонентних систем, дослідження структури та властивостей виявлених фаз.

Потенціал, який відкривають шаруваті напівпровідники для вивчення ряду нових явищ у фізиці твердого тіла, далеко ще не вичерпаний, та інтерес дослідників до них постійно зростає. Властивості твердих розчинів на основі халькогенідів Талію дозволяють керувати їх фізичними параметрами та використовувати у ролі детекторів, оптичних аналізаторів, фото- та рентгеноперетворювачів, приймачів видимої та ІЧ-областей спектру.

Дослідження системи $\text{TlInSe}_2\text{--SnSe}_2$ (Mozolyuk, 2011), вказують на утворення широкої області твердих розчинів в інтервалі 0–28 мол.% SnSe_2 . Для кристалів $\text{Ti}_{1-x}\text{In}_x\text{Sn}_x\text{Se}_2$ ($x=0; 0,1; 0,2; 0,25$) досягнуті значення параметрів нелінійно-оптичних ефектів третього порядку є максимально критичними, що дозволяє передбачити їх широке використання як ефективних матеріалів для нелінійного перетворення частот у ІЧ області спектру, що є критично для ІЧ лідарних систем. Особливим інтересом може бути їх застосування у фотонних гратках (Myronchuk, 2013).

Сімейство бінарних сполук TiX ($X=\text{S, Se, Te}$) та їх похідних добре відоме як напівпровідники для оптичних застосувань (Itoga, 1971). Існують також упорядковані потрійні представники TiTiX_2 ($\text{Ti}=\text{Al, Ga, In}$) з двома кристалографічними центрами з різними координаційними середовищами, але не можна виключити існування твердих розчинів для різних халькогенідів. Для збільшення можливостей керування фізичними властивостями сполук на основі талію були синтезовані кристали $(\text{TiGaSe}_2)_{1-x}(\text{SnSe}_2)_x$ ($x=0,05; 0,1$). У даній роботі представлені результати експериментальних досліджень оптичних властивостей даних сполук для розуміння їх потенціалу в оптоелектронних і фотонних пристроях.

Ключові слова. Напівпровідник, оптичні властивості, заборонена зона, край поглинання, правило Урбаха.

Dmytro IVANYUK

Postgraduate 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: <https://orcid.org/0000-0003-0807-2140>

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: <https://orcid.org/0000-0002-3581-8852>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422272900

To cite this article: Ivanyuk, D., Kevshyn, A. (2025). Optychni vlastyvoli krystaliv $(\text{TiGaSe}_2)_{1-x}(\text{SnSe}_2)_x$ ($x=0,05; 0,1$) [Optical properties of crystals $(\text{TiGaSe}_2)_{1-x}(\text{SnSe}_2)_x$ ($x=0,05; 0,1$)]. *Physics and Educational Technology*, 1, 20–30, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-3>

OPTICAL PROPERTIES OF CRYSTALS $(\text{TiGaSe}_2)_{1-x}(\text{SnSe}_2)_x$

The development of modern technologies requires the search for new promising materials as the main source of expanding and improving the functionality of semiconductor electronics devices. The scientific basis of such a search is the study of the physical properties of multicomponent systems, the study of the structure and properties of the identified phases.

The potential that layered semiconductors open for the study of a number of new phenomena in solid-state physics is far from exhausted, and the interest of researchers in them is constantly growing. The properties of solid solutions based on Thallium chalcogenides make it possible to control their physical parameters and use them as detectors, optical analyzers, photo- and X-ray converters, and receivers of the visible and IR regions of the spectrum.

Studies of the TlInSe_2 – SnSe_2 system (Mozolyuk, 2011) indicate the formation of a wide range of solid solutions in the range of 0–28 mol.% SnSe_2 . For $\text{Tl}_{1-x}\text{In}_x\text{Sn}_x\text{Se}_2$ crystals ($x=0; 0,1; 0,2; 0,25$), the achieved values of the parameters of the third-order nonlinear optical effects are maximally critical, which allows us to predict their wide use as effective materials for nonlinear frequency conversion in the IR region of the spectrum, which is critical for IR lidar systems. Of particular interest may be their use in photonic gratings (Myronchuk, 2013).

The family of binary compounds TiX ($X=\text{S, Se, Te}$) and their derivatives are well known as semiconductors for optical applications (Itoga, 1971). There are also ordered ternary representatives of TiTlX_2 ($\text{Tl}=\text{Al, Ga, In}$) with two crystallographic centers with different coordination environments, but the existence of solid solutions for different chalcogenides cannot be excluded. Crystals $(\text{TiGaSe}_2)_{1-x}(\text{SnSe}_2)_x$ ($x=0,05; 0,1$) were synthesized to increase the possibilities of controlling the physical properties of thallium-based compounds. This work presents the results of experimental studies of the optical properties of these compounds to understand their potential in optoelectronic and photonic devices.

Key words: semiconductor, optical properties, band gap, absorption edge, Urbach's rule.

Актуальність проблеми. Дослідження оптичних властивостей матеріалів на основі талію є актуальним з кількох ключових причин, які пов'язані з їх унікальними характеристиками та широким спектром потенційного застосування у сучасних технологіях. Талієві халькогеніди мають регульовану ширину забороненої зони (від ультрафіолетового до інфрачервоного спектру), що робить їх ідеальними для фотодетекторів у видимому та інфрачервоному діапазонах, оптичних сенсорів для автоматизації, телекомунікацій та медицини. Розвиток сучасної оптоелектроніки вимагає нових матеріалів із точним налаштуванням оптичних параметрів, які легко забезпечити завдяки багатокомпонентним системам на основі талію.

Мета дослідження – дослідити оптичні властивості кристалів $(\text{TiGaSe}_2)_{1-x}(\text{SnSe}_2)_x$ ($x=0,05; 0,1$).

Виклад основного матеріалу. Як вихідні компоненти для виготовлення досліджуваних зразків використовували високочисті елементи Tl , Sn , Ga , Se (чистота є більшою 99,99 вагових %). Зразки виготовляли сплавлянням у вакуумованих кварцевих ампулах в печі шахтного типу. Зразки нагрівали до максимальної температури, при якій витримували 5 год. Далі розплави охолоджували з швидкістю 10–20 К/

год до температури 520 К і відпалювали для встановлення рівноважного стану протягом 500 год. Після відпалу ампули зі зразками загартували до кімнатної температури на повітрі.

Методом Бріджмена-Стокбаргера були отримані монокристали з області твердих розчинів із вмістом 5, 10 мол.% SnSe_2 у двозонній вертикальній печі. Розраховані кількості елементів загальною масою 10 г у кожному випадку завантажували у кварцові контейнери з конусоподібним дном, вакуумували та запаювали. Спочатку синтез проводився у печі шахтного типу, де розміщувалися кварцові контейнери з шихтою (конусною частиною вверх) і нагрівалися до температури 1220 К. При максимальній температурі проводилася витримка протягом 10 год, після якої контейнери в розплавом переносилися у попередньо виведені на режим вирощування ростові печі (конусною частиною донизу). Максимальні температури зони росту (верхня піч) підбиралися із врахуванням фазової діаграми системи TiGaSe_2 – SnSe_2 і становили 70–80 К вище температур лінії ліквідуса, а температури зони відпалу (нижня піч) складала 720–770 К. Градієнт температур на фронті кристалізації знаходився в інтервалі 3–3,5 К/мм. Швидкість переміщення контейнера з розплавом становила 7 мм/добу. Після досягнення ізотермічної зони

кристали відпалювали протягом 100 год. Ще 100 год було витрачено на їх охолодження до кімнатної температури. Максимальні розміри монокристалів були лімітовані вагою шихти і розмірами контейнера і не перевищували 20-25 мм довжиною та були у діаметрі до 13 мм.

Для проведення оптичних досліджень зразки сколювались від середньої частини монокристалічного злитку. Слід зауважити, що всі досліджувані кристали мали шарувату структуру. Це дозволило проводити оптичні вимірювання на плоско-паралельних поверхнях оптичної якості без додаткового шліфування та полірування кристалів. В якості диспергуючого приладу слугував монохроматор MDR-206. В досліджуваному діапазоні довжин хвиль роздільна здатність становила 0,5 нм. Для проведення досліджень в діапазоні температур 100-300 К використовували азотний кріостат з можливістю стабілізації температури за допомогою терморегулятора Utrecs K41-3 (точність стабілізації становила $\pm 0,2$ К).

Область застосувань напівпровідників в оптоелектроніці пов'язана з шириною забороненої зони. Тому для оцінки оптичної ширини забороненої зони було проведено дослідження спектрального розподілу коефіцієнта пропускання, та за формулою (Pankove, 1971):

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{(1-R)^2}{2T} + \left(\frac{(1-R)^4}{4T^2} + R^2 \right)^{1/2} \right],$$

де I – інтенсивність світла, що пройшло через зразок; I_o – інтенсивність світла, що падає на поверхню зразка; R – коефіцієнт відбивання за нормального падіння світла; α – коефіцієнт поглинання світла; d – товщина зразка; $T = \frac{I}{I_o}$ – коефіцієнт пропускання, розраховано коефіцієнти поглинання в білякрайовій області. Результати розрахунків представлено на рис. 1.

Аналіз спектральної залежності коефіцієнта поглинання в білякрайовій області показав, що в досліджуваному діапазоні температур в кристалах $(\text{TiGaSe}_2)_{1-x}(\text{SnSe}_2)_x$ ($x=0,05; 0,1$) реалізуються як прямі дозволені (рис. 2) так і непрямі дозволені переходи (рис. 3), що добре узгоджується з даними робіт (Vytautas, 2006; Simon Johnsen, 2011).

Для визначення ширини забороненої зони при реалізації прямих (E_g^d) і непрямих (E_g^i)

дозволених переходів прямі $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$ та $(\alpha h\nu)^{1/2} = f(h\nu)$ екстраполювались до $(\alpha h\nu)^{1/2} = 0$ та $(\alpha h\nu)^2 = 0$ (рис. 2, рис. 3., табл. 1).

Із рис. 2 та табл. 1 видно, що з збільшенням x (тобто збільшенням вмісту SnSe_2) край смуги фундаментального поглинання зміщується в область менших енергій. Зменшення ширини забороненої зони можна пов'язати з механізмом утворення твердого розчину, згідно з яким відбувається статистичне заміщення атомів Ga ($r(\text{Ga}^{+3})=0,062$ нм) атомами Sn ($r(\text{Sn}^{+4})=0,067$ нм) і збільшення концентрації вакансій талію. Отримані результати засвідчують, що зі збільшенням температури для всіх досліджуваних зразків ширина забороненої зони зменшується. У роботі (Mott, 1971) зміну ширини забороненої зони з температурою пов'язують зі зміною частоти фононів, які стимулюють різні ефекти, а саме: теплове розширення решітки, збільшення електрон-фононного зв'язку, і, як наслідок, взаємного відштовхування внутрішньозонних електронних станів.

Числове моделювання температурної залежності ширини забороненої зони з врахуванням теплового розширення енергетичних станів дозволених зон напівпровідника проведено в роботі (Huliamov, 2011). Встановлено, що зі збільшенням температури, границі зон провідності і валентної зони починають помітно проникати в глибину забороненої зони, що призводить до її зменшення. За результатами представленими у таблиці 2 визначено температурний коефіцієнт зміни ширини забороненої зони, який становить $3 \div 4,5 \cdot 10^{-4}$ еВ/К, що добре узгоджується з даними роботи (Myronchuk, 2014; Davydyuk, 2013). Нижче області сильного поглинання у всьому діапазоні можливих складів і температур спостерігається експоненційна залежність α від λ (рис. 4).

На експоненційній ділянці залежність $\alpha(\lambda)$ підпорядковується правилу Урбаха (Urbach, 1953):

$$\alpha(h\nu, T) = \alpha_0 \exp \left[\frac{h\nu - E_0}{E_u(T)} \right], \quad (2)$$

де α – коефіцієнт поглинання світла, α_0 – стала, яка залежить від якості зразка, E_0 – параметр близький до ширини забороненої зони при $T = 0$ К, E_u – енергія Урбаха ($E_u = \frac{k_B T}{\sigma(T)}$), k_B – стала Больцмана, $\sigma(T)$ – параметр

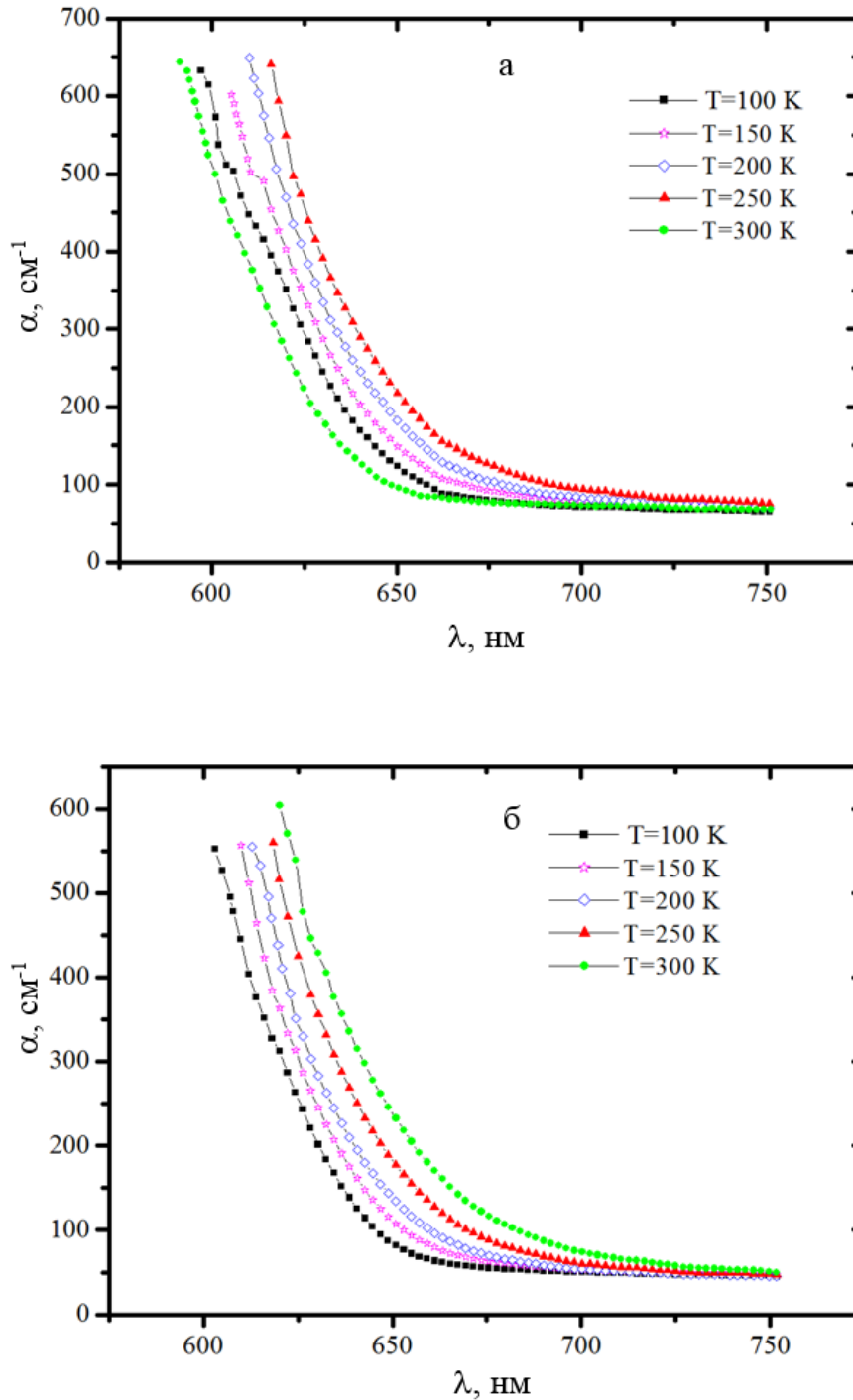


Рис. 1. Типові спектри коефіцієнта поглинання при 100, 150, 200 і 300 К для кристалів $(\text{TlGaSe}_2)_{1-x}(\text{SnSe}_2)_x$: а) $x=0,05$; б) $x=0,1$

крутизни краю поглинання, яка рівна енергетичній ширині області краю поглинання і є мірою розупорядкування матеріалу. З експериментальних результатів E_U визначена як $E_U = \Delta(h\nu) / \Delta(\ln \alpha)$, α_0 і E_0 координати точки збіжності $\ln \alpha = f(h\nu, T)$.

Апроксимація спектрів поглинання за формулою Урбаха дозволила отримати значення E_U ,

α_0 і E_0 , які представлені в таблиці 2 та на рис. 5.

Температурну залежність енергії Урбаха визначену з експериментальних даних за співвідношенням $E_U = \frac{\Delta(h\nu)}{\Delta(\ln \alpha)}$ представлено на рис. 3.7 відкритими точками.

Як видно з таблиці 2 та рис. 5, характерним для сполук різного складу є зростання E_U

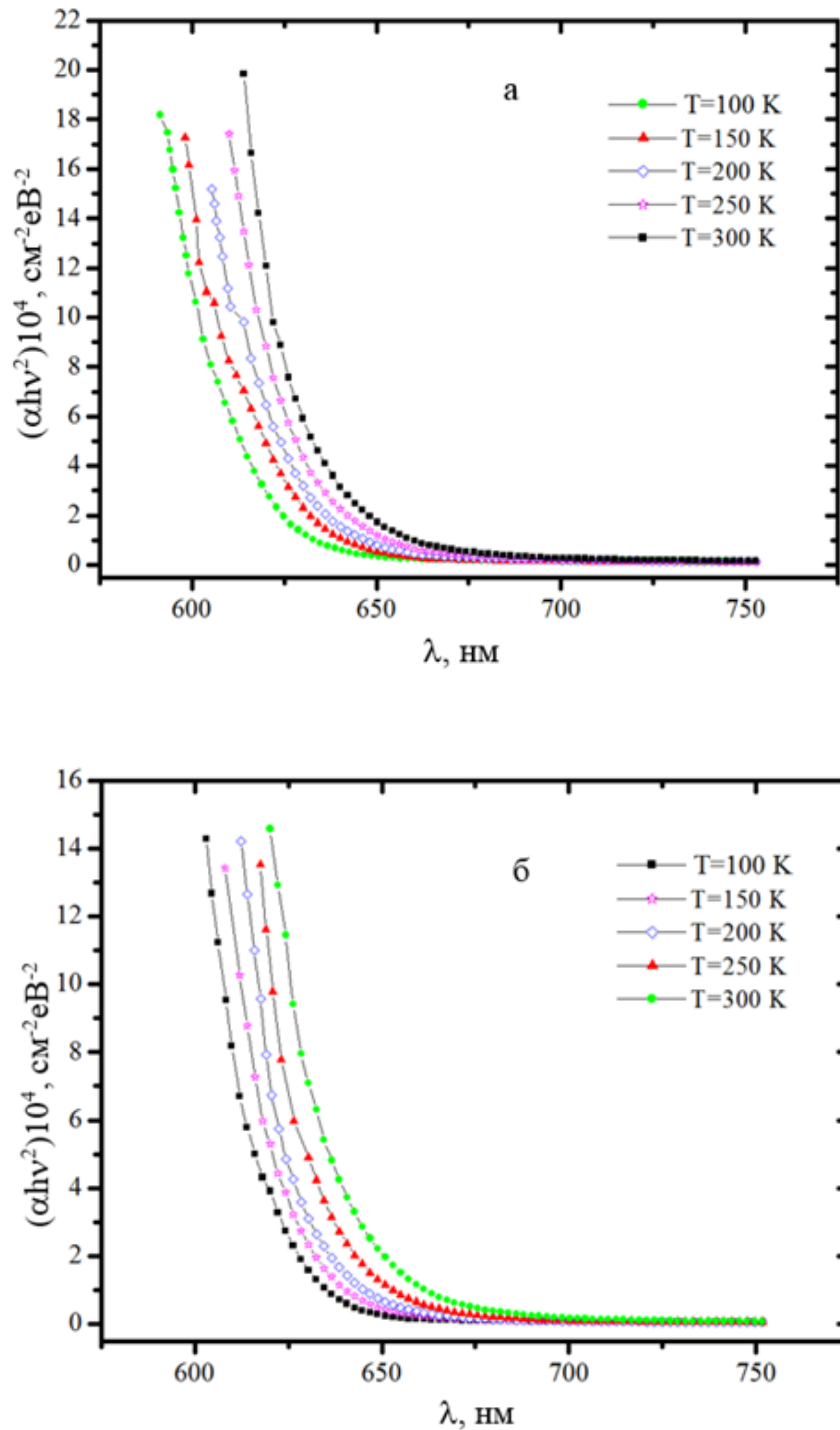


Рис. 2. Прямая залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі для кристалів $(\text{TlGaSe}_2)_{1-x}(\text{SnSe}_2)_x$: а) $x=0,05$; б) $x=0,1$

при збільшенні температури зразків від 100 до 300 K. Ми вважаємо, що це зв'язано зі збільшенням концентрації заряджених дефектів, які були нейтральні при низькій температурі внаслідок їх термоіонізації.

Деякий вклад у зростання E_U при збільшенні температури вносить додаткова іонізація дефектних центрів у зразку, що зумовлює

порушення періодичності потенціалу випадковим електричним полем, створеним флуктуацією концентрації заряджених дефектів (Mott, 1971).

Температурна залежність E_U достатньо добре узгоджується з емпіричною моделлю, запропонованою З. Янгом та ін. (Yang, 1995), яка враховує вплив електрон/екситон-фононної

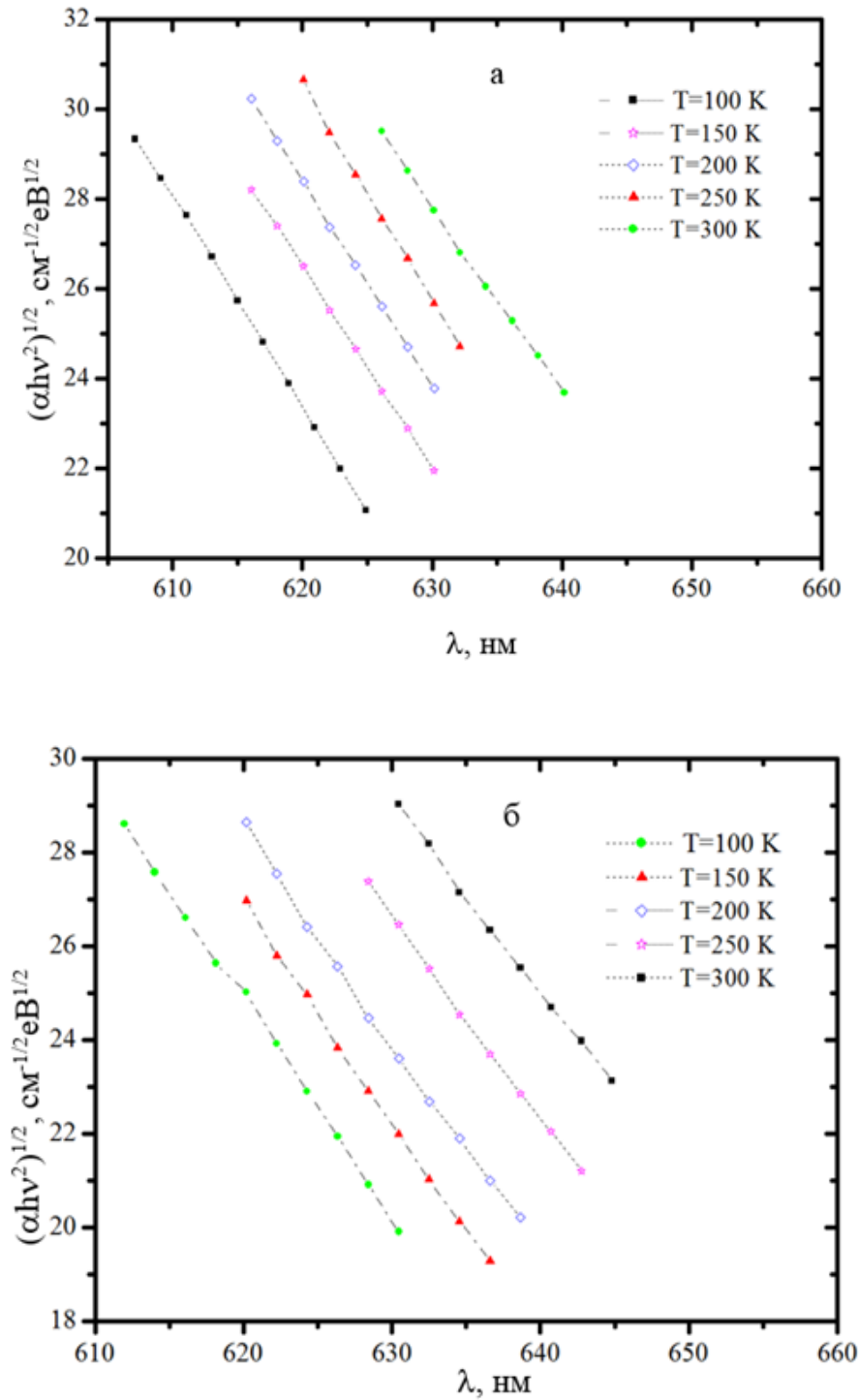


Рис. 3. Неряма залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі для кристалів $(\text{TlGaSe}_2)_{1-x}(\text{SnSe}_2)_x$: а) $x=0,05$; б) $x=0,1$

Залежність ширини забороненої зони від температури в кристалах $((\text{TlGaSe}_2)_{1-x}(\text{SnSe}_2)_x)$ Таблиця 1

Зразок	Температура зразка, К	E_g^d , еВ	E_g^i , еВ	Зразок	Температура зразка, К	E_g^d , еВ	E_g^i , еВ
x=0,05	100	2,02	1,82	x=0,10	100	1,99	1,81
	150	2,00	1,80		150	1,98	1,80
	200	1,98	1,79		200	1,97	1,77
	250	1,96	1,77		250	1,95	1,75
	300	1,95	1,75		300	1,93	1,72

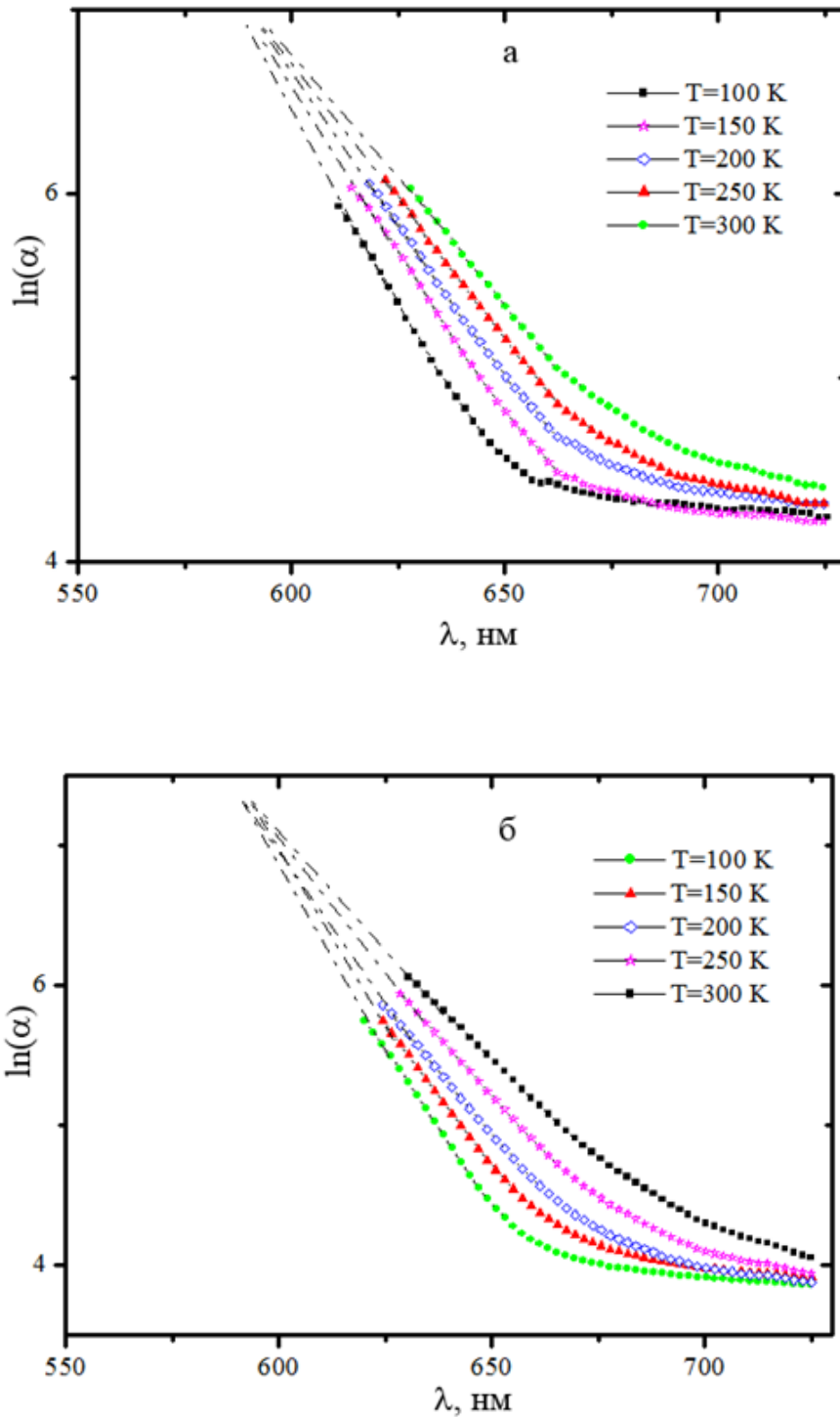


Рис. 4. Логарифмічна спектральна залежність коефіцієнта поглинання кристалів $(\text{TiGaSe}_2)_{1-x}(\text{SnSe}_2)_x$: а) $x=0,05$; б) $x=0,1$

взаємодії та структурних і композиційних порушень на енергію фононів, які пов'язані з хвостами Урбаха. Для оцінки домінуючих механізмів, які вносять вклад у розмиття краю власного поглинання проаналізована температурна залежність енергії Урбаха. Встановлено, E_U можна моделювати як осцилятор Ейнштейна (Beaudoin, 1997), який враховує вклади

динамічних (теплових) та статичних (структурних і композиційних) розупорядкувань. Згідно цієї моделі енергія Урбаха може бути виражена наступним співвідношенням:

$$E_U = A \left(\frac{1}{e^{\Theta/T} - 1} \right) + B,$$

де A і B – константи, пов'язані з тепловими,

Таблиця 2

Параметри правила Урбаха

Зразок	Температура зразка, К	Енергія Урбаха, меВ	Параметр крутизни	Зразок	Температура зразка, К	Енергія Урбаха, меВ	Параметр крутизни
x=0,05	100	66	0,13	x=0,10	100	79	0,11
	150	75	0,17		150	87	0,15
	200	85	0,20		200	96	0,18
	250	90	0,23		250	102	0,21
	300	103	0,25		300	111	0,23

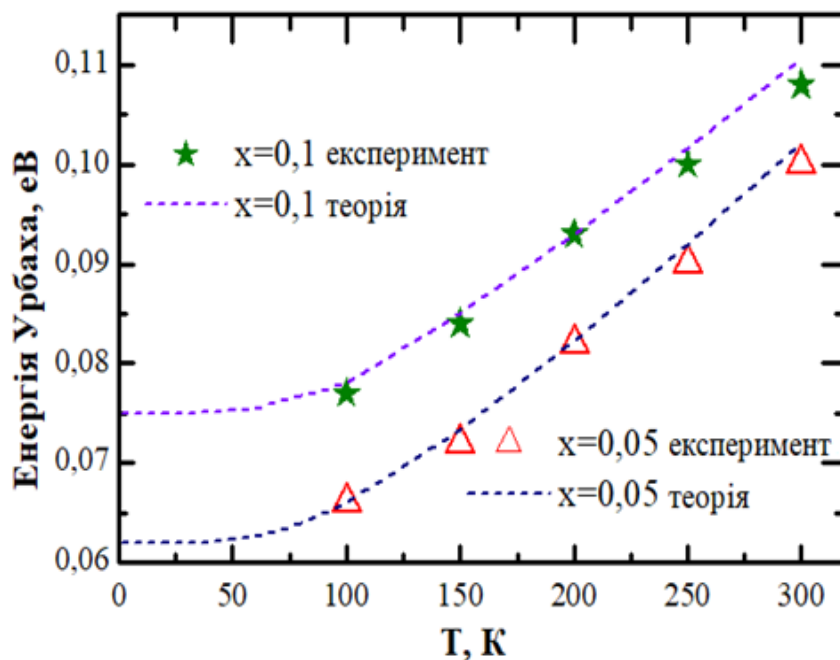


Рис. 5. Температурна залежність енергії Урбаха для кристалів $(\text{TlGaSe}_2)_{1-x}(\text{SnSe}_2)_x$

структурними і композиційними розладами. Θ – температура Ейнштейна, яка відповідає середній частоті фононних збуджень невзаємодіючих осциляторів.

Рівняння (3) означає, що енергія Урбаха, залежить від електрон-фононної взаємодії і структурних розладів як сума двох доданків. Перший доданок рівняння (3) являє собою вклад електрон-фононної взаємодії як фактор Дебая-Уоллера, а другий зумовлений середньоквадратичним відхиленням атомів від положення рівноваги, яке викликане структурним безладом від ідеально впорядкованої решітки. На рис. 5 представлено найкращу узгодженість експериментальних результатів (відкриті точки) та рівняння 3 з регульованими параметрами A та B (суцільна лінія). Для кристалів $(\text{TlGaSe}_2)_{1-x}(\text{SnSe}_2)_x$ при $x=0,05$ регульований параметр A та B становить 62 та 62 меВ; при $x=0,1$: 55 та 75 меВ відповідно.

Враховуючи значення параметрів A та B , видно, що при $x=0,05$ вклад в енергію Урбаха обох доданків співмірний. Збільшення параметра B зі збільшенням концентрації SnSe_2 ($x=0,1$), очевидно, зумовлено зростанням концентрації структурних дефектів, що підтверджено рентгеноструктурними дослідженнями.

З експериментальних даних за схилами хвостів області краю власного поглинання розраховано параметр крутизни $\sigma(T) = \frac{kT\Delta(\ln \alpha)}{\Delta(h\nu)}$, що представлено на рис. 6 відкритими точками.

У всьому досліджуваному діапазоні температур залежність $\sigma(T)$ апроксимується виразом для краю поглинання, який формується з участю електрон-фононної взаємодії (Kurik, 1971; Kurik, 1991):

$$\sigma(T) = \sigma_0 \left(\frac{2kT}{h\nu_0} \right) \text{th} \left(\frac{h\nu_0}{2kT} \right), \quad (1)$$

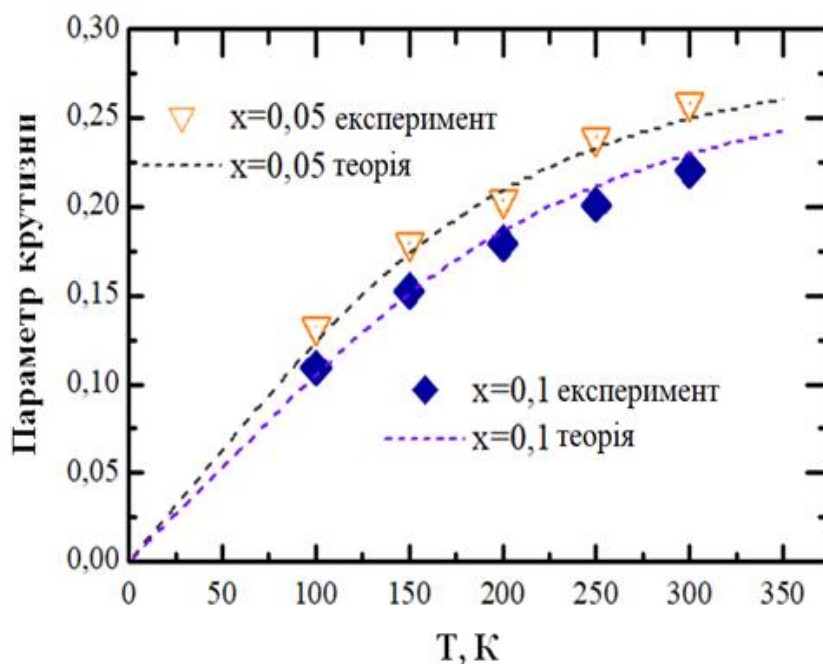


Рис. 6. Температурна залежність параметра крутизни для кристалів $(\text{TlGaSe}_2)_{1-x}(\text{SnSe}_2)_x$

де $h\nu_0$ – ефективна енергія фононів, яка в більшості випадків співпадає з енергією фононів, що беруть участь в утворенні довгохвильової сторони краю поглинання; σ_0 – температурно-незалежний, але залежний від матеріалу параметр, який обернено пропорційний константі взаємодії g між електронами/екситонами і фононами за формулою $\sigma_0 = (2/3)g^{-1}$.

Щоб отримати оцінку значення енергії фононів, які пов'язані з хвостами Урбаха, експериментальні дані були приведені до рівняння (1) з σ_0 і $h\nu_0$ у якості регульованих параметрів. Найкраще узгодження експериментальних даних із рівнянням 1 представлене на рис. 6 суцільними лініями. Параметри апроксимації були наступні: $\sigma_0 = 0.30$ та 0.29 ; $h\nu_0 = 41$ та 47 меВ для $x=0.05$ та 0.1 відповідно, що добре узгоджується з результатами (Piasecki, 2016). Ефективні енергії фононів $h\nu_0$ є більшими за найвищу оптичну моду в кристалах TlGaSe_2 (Paucar, 2015). Більше значення $h\nu_0$ у халькогенідах були пов'язані зі структурними порушеннями, що викликані катіонними розладами (міжвузловими атомами, катіонними вакансіями) та відхиленням від ідеальної стехіометрії (Abay, 2001). Зменшення σ_0 при збільшенні концентрації SnSe_2 можна пов'язати зі збільшенням

концентрації іонів Sn^{+4} у вузлах Ga^{+3} та збільшенням концентрації вакансій срібла, оскільки вони, як заряджена домішка, впливають на електрон-фононну взаємодію. Аналогічний результат отриманий для кристалів TlInSe_2 при заміщенні іонів In іонами Si або Ge (Piasecki, 2016; Davydyuk, 2013).

Висновки. Проведено експериментальні дослідження оптичних властивостей кристалів $(\text{TlGaSe}_2)_{1-x}(\text{SnSe}_2)_x$ ($x=0.05; 0.1$) в діапазоні температур 100-300 К. Аналіз спектральної залежності коефіцієнта поглинання в білякрайовій області показав, що в досліджуваному діапазоні температур в досліджуваних кристалах реалізуються як прямі дозволені так і непрямі дозволені переходи. За результатами експериментальних досліджень визначено ширину забороненої зони кристалів. Встановлено, що при збільшенні вмісту SnSe_2 відбувається збільшення ширини забороненої зони, що можна пов'язати з механізмом утворення твердого розчину, згідно з яким відбувається статистичне заміщення атомів Ga атомами Sn і збільшення концентрації вакансій талію.

За допомогою апроксимації спектрів поглинання було визначено температурну залежність енергії Урбаха, за схилами хвостів області краю власного поглинання розраховано параметр крутизни. Оцінено значення енергії фононів, які пов'язані з хвостами Урбаха.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Mozolyuk M. Yu., Piskach L. V., Fedorchuk A. O., Kityk I. V., Olekseyuk I. D., Parasyuk O. V. Phase diagram of the quasi-binary system $\text{TlInSe}_2\text{--SnSe}_2$. *J. Alloys Compd.* 2011. Vol. 509. P. 2693–2696.
2. Myronchuk G. L., Davydyuk G. E., Parasyuk O. V., Khyzhun O. Y., Andrievski R. A., Fedorchuk A. O., Danylchuk S. P., Piskach L. V., Mozolyuk M. Yu. $\text{Ti}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ ($x = 0; 0,1; 0,2; 0,25$) single-crystalline alloys as promising non-linear optical materials. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2013. Vol. 24. P. 3555–3563.
3. Itoga R.S., Kannewurf C.R. Electrical resistivity, hall effect and optical absorption in TlS , $\text{TlS}_{0,5}\text{Se}_{0,5}$ and TlSe . *J. Phys. Chem. Solids*. 1971. Vol. 32. № 6. P. 1099–1110.
4. Pankove J. I. *Optical Processes in Semiconductors*, Prentice-Hall, New Jersey. 1971. 422 p.
5. Vytautas Grivickas, Vitalijus Bikbajevs, and Paulius Grivickas. Indirect absorption edge of TlGaSe_2 crystals *Phys. stat. sol. (b)*. 2006. Vol. 243. №. 5. P. R31–R33.
6. Simon Johnsen, Zhifu Liu, John A. Peters, Jung-Hwan Song, Sebastian C. Peter, Christos D. Malliakas, Nam Ki Cho, Hosub Jin, Arthur J. Freeman, Bruce W. Wessels, and Mercouri G. Kanatzidis. Thallium Chalcogenide-Based Wide-Band-Gap Semiconductors: TlGaSe_2 for Radiation Detectors. *Chem. Mater.* 2011. Vol. 23. P. 3120–3128.
7. Mott N. F., Davis E. A. *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*, Oxford University Press, New York. 1971. 590 p.
8. Гулямов Г., Шарибаев Н. Ю. Влияние температуры на ширину запрещенной зоны полупроводника. *Физическая инженерия поверхности*. 2011. Т. 9. № 1. С. 40–43.
9. Myronchuk G. L., Zamurueva O. V., Parasyuk O. V., Piskach L. V., Fedorchuk A. O., AlZayed N. S., El-Naggar A. M., Ebothe J., Lis M., Kityk I. V. Structural and optical properties of novel optoelectronic $\text{Ti}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_2$ single crystals. *J. Mater Sci: Mater Electron*. 2014. Vol. 25. P. 3226–3232.
10. Davydyuk G. E., Piasecki M., Parasyuk O.V., Myronchuk G. L., Fedorchuk A. O., Danylchuk S. P., Piskach L. V., Mozolyuk M. Yu., AlZayed N., Kityk I. V. Twophoton absorption of $\text{Ti}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ ($x=0, 0.1, 0.2, 0.25$) single crystalline alloys and their nanocrystallites. *Optical Materials*. 2013. Vol. 35. P. 2514–2518.
11. Urbach F. The Long-Wavelength Edge of Photographie Sensitivity and of the Electronic Absorption of Solids. *Phys. Rev.* 1953. Vol. 92. № 5. P. 1324–1324.
12. Yang Z., Homewood K. P., Finney M. S., Harry M. A., Reeson K. J. Optical absorption study of ion beam synthesized polycrystalline semiconducting FeSi_2 . *J. Appl. Phys.* 1995. Vol. 78. № 3. P. 1958–1963.
13. Beaudoin M., DeVries A. J. G., Johnson S. R., Laman H., Tiedje T. Optical absorption edge of semi-insulating GaAs and InP at high temperatures. *Appl. Phys. Lett.* 1997. Vol. 70. P. 3540–3542.
14. Kurik, M. V. (1971). Urbach rule. *Phys. Status Solidi A.*, 8, 9–30.
15. Kurik, M. V. (1991). Experimental evaluation of exciton-phonon interaction constant. *Fiz. Tverd. Tela.*, 33, 615–618.
16. Piasecki M., Myronchuk G. L., Zamurueva O. V., Khyzhun O. Y., Parasyuk O. V., Fedorchuk A. O., Albassam A., El-Naggar, Kityk A. M., I. V. Huge Operation by Energy Gap of Novel Narrow Band Gap $\text{Ti}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{B}_x\text{Se}_2$ ($\text{B} = \text{Si}, \text{Ge}$): DFT, X-ray Emission and Photoconductivity Studies. *Mater. Res. Express*. 2016. Vol. 3. № 2. P. 025902.
17. Paucar R., Itsuwa H., Wakita K., Shim Y., Alekperov O., Mamedov N. Phase transitions and Raman scattering spectra of TlGaSe_2 . *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. Vol. 619 P. 012018.
18. Abay B., Güder H. S., Efeoglu H., Yoğurtçu Y. K. Temperature dependence of the optical energy gap and Urbach-Martienssen's tail in the absorption spectra of the layered semiconductor $\text{Ti}_2\text{GaInSe}_4$. *J. Phys. Chem. Solids*. 2001. Vol. 62. P. 747–752.

REFERENCES:

1. Mozolyuk, M. Yu., Piskach, L. V., Fedorchuk, A. O., Kityk, I. V., Olekseyuk, I. D., & Parasyuk, O. V. (2011). Phase diagram of the quasi-binary system $\text{TlInSe}_2\text{--SnSe}_2$. *J. Alloys Compd.*, 509, 2693–2696.
2. Myronchuk, G. L., Davydyuk, G. E., Parasyuk, O. V., Khyzhun, O. Y., Andrievski, R. A., Fedorchuk, A. O., Danylchuk, S. P. et. al. (2013). $\text{Ti}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ ($x = 0; 0,1; 0,2; 0,25$) single-crystalline alloys as promising non-linear optical materials. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 24, 3555–3563.
3. Itoga, R. S., & Kannewurf, C. R. (1971). Electrical resistivity, hall effect and optical absorption in TlS , $\text{TlS}_{0,5}\text{Se}_{0,5}$ and TlSe . *J. Phys. Chem. Solids*, 32, 1099–1110.
4. Pankove, J. I. (1971). *Optical Processes in Semiconductors*. Prentice-Hall, New Jersey.
5. Vytautas Grivickas, Vitalijus Bikbajevs, and Paulius Grivickas. (2006). Indirect absorption edge of TlGaSe_2 crystals *Phys. stat. sol. (b)*, 243, R31–R33.
6. Simon Johnsen, Zhifu Liu, John A. Peters, Jung-Hwan Song, Sebastian C. Peter, Christos D. Malliakas et. al. (2011). Thallium Chalcogenide-Based Wide-Band-Gap Semiconductors: TlGaSe_2 for Radiation Detectors. *Chem. Mater.*, 23, 3120–3128.

7. Mott N. F., Davis E. A. (1971). *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*. Oxford University Press, New York.
8. Huliymov, H., & Sharybaev, N. Yu. (2011). Vliyaniye temperatury na shyrynu zapreshchennoi zony poluprovodnyka [Effect of temperature of the bandgap energy of a semiconductor]. *Fyzycheskaia ynzheneryia poverkhnosty – Journal of Surface Physics and Engineering*, 9, 40–43.
9. Myronchuk, G. L., Zamurueva, O. V., Parasyuk, O. V., Piskach, L. V., Fedorchuk, A. O., AlZayed, N. S. et. al. (2014). Structural and optical properties of novel optoelectronic $\text{Ti}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Si}_x\text{Se}_2$ single crystals. *J. Mater Sci: Mater Electron*, 25, 3226–3232.
10. Davydyuk, G. E., Piasecki, M., Parasyuk, O. V., Myronchuk, G. L., Fedorchuk, A. O., Danylchuk, S. P. et. al. (2013). Twophoton absorption of $\text{Ti}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}_2$ ($x=0, 0.1, 0.2, 0.25$) single crystalline alloys and their nanocrystallites. *Optical Materials*, 35, 2514–2518.
11. Urbach, F. The Long-Wavelength Edge of Photographic Sensitivity and of the Electronic Absorption of Solids (1953). *Phys. Rev.*, 92, 1324–1324.
12. Yang, Z., Homewood, K. P., Finney, M. S., Harry, M. A., & Reeson, K. (1995). J. Optical absorption study of ion beam synthesized polycrystalline semiconducting FeSi_2 . *J. Appl. Phys.*, 78, 1958–1963.
13. Beaudoin, M., DeVries, A. J. G., Johnson, S. R., Laman, H., Tiedje, T. (1997). Optical absorption edge of semi-insulating GaAs and InP at high temperatures. *Appl. Phys. Lett.*, 70, 3540–3542.
14. Kurik, M. V. (1971). Urbach rule. *Phys. Status Solidi A*. Vol. 8. P. 9–30.
15. Kurik, M. V. (1991). Experimental evaluation of exciton-phonon interaction constant. *Fiz. Tverd. Tela*. Vol. 33. P. 615–618.
16. Piasecki, M., Myronchuk, G. L., Zamurueva, O. V., Khyzhun, O. Y., Parasyuk, O. V., Fedorchuk, A. O. et. al. (2016). Operation by Energy Gap of Novel Narrow Band Gap $\text{Ti}_{1-x}\text{In}_{1-x}\text{B}_x\text{Se}_2$ ($\text{B} = \text{Si}, \text{Ge}$): DFT, X-ray Emission and Photoconductivity Studies. *Mater. Res. Express*, 3, 025902.
17. Paucar, R., Itsuwa, H., Wakita, K., Shim, Y., Alekperov, O., & Mamedov, N. (2015). Phase transitions and Raman scattering spectra of TlGaSe_2 . *Journal of Physics: Conference Series*, 619, 012018.
18. Abay, B., Güder, H. S., Efeoğlu, H., & Yoğurtçu, Y. K. (2001). Temperature dependence of the optical energy gap and Urbach-Martienssen's tail in the absorption spectra of the layered semiconductor $\text{Tl}_2\text{GaInSe}_4$. *J. Phys. Chem. Solids*, 62, 747–752.

УДК 378.147:621.3

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-4>

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, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/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, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0066-7174>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422525700

Назар КЕВШИН

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-9932-8447>

Бібліографічний опис статті: Кевшин, А., Гальян, В., Кевшин, Н. (2025). Розв'язання задач з фізики як засіб розвитку професійних компетентностей студентів. *Фізика та освітні технології*, 1, 31–38, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-4>

МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ПРОФЕСІЙНИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ СТУДЕНТІВ ЗАСОБАМИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ З ФІЗИКИ

Одним із важливих засобів розвитку мисленнєвих і творчих здібностей здобувачів освіти є розв'язання задач, які сприяють глибшому засвоєнню курсу фізики – базового для вивчення спеціальних освітніх компонент. Фізична задача, як елемент освітнього процесу, є найефективнішою формою самостійного поглиблення знань та закріплення теоретичного матеріалу. У ході розв'язання задач задіюються всі основні мисленнєві операції, такі як абстрагування, аналіз, дедукція, узагальнення, порівняння та синтез. Варто зазначити, що більшість здобувачів освіти першого курсу стикаються з труднощами під час розв'язування задач. Це пов'язано з тим, що вони часто формально запам'ятовують закони, визначення, поняття й формули, не розуміючи особливостей умов та меж їх застосування. У результаті ці знання неправильно або некоректно використовуються в конкретних фізичних ситуаціях.

У сучасних умовах процес навчання фізики у вищому навчальному закладі являє собою складну задачу, оскільки багато здобувачів освіти не підготовлені до засвоєння нової інформації. Вони не уміють відповідати на запитання, пояснювати спостережувані явища, працювати з приладами, не знають фундаментальних фізичних законів і т.д. У зв'язку з цим виникає роль викладача, який повинен створити умови для розвитку творчості, пізнавальних інтересів, інтелектуальних здібностей студентів, спираючись на гуманізацію, диференціацію та індивідуалізацію навчання.

Для підготовки компетентного спеціаліста, конкурентоспроможного, такого, що має експериментальні вміння і навички, здатний оперувати сучасною термінологією та новітніми досягненнями, науковими поняттями, законами, концепціями, вченнями і теоріями природничих наук, необхідно забезпечити високий рівень фундаментальної підготовки як основи професійних компетентностей. Розв'язання фізичних задач є елементом у формуванні таких навичок. Цей процес допомагає засвоєнню не лише теоретичних знань, але й розвитку практичних навичок, критичного мислення та вміння відновити знання в реальних умовах (Бургун, 2016).

Ключові слова: професійна компетентність, критичне мислення, розв'язування задач.

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: <https://orcid.org/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: <https://orcid.org/0000-0003-0066-7174>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422525700

Nazar KEVSHYN

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: <https://orcid.org/0009-0009-9932-8447>

To cite this article: Kevshyn, A., Halyan, V., Kevshyn, N. (2025). Rozviazannia zadach z fizyky yak zasib rozvytku profesiinykh kompetentnostei studentiv [Connecting problems with physics as a way to develop professional competencies of students]. *Physics and Educational Technology*, 1, 31–38, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-4>

METHODOLOGICAL ASPECTS OF DEVELOPING STUDENTS' PROFESSIONAL COMPETENCIES BY SOLVING PHYSICS PROBLEMS

One of the important ways to develop the mental and creative abilities of educational students is the development of tasks that are related to the general mastered physics course – the basis for the development of special educational components. A physical task, as an element of the illumination process, is the most effective form of independent acquisition of knowledge and consolidation of theoretical material. In the course of solving problems, all the basic mental operations are involved, such as abstraction, analysis, deduction, inference, equation and synthesis.

Varto notes that most first-year students experience difficulties when solving problems. This is due to the fact that they often formally remember laws, meanings, concepts and formulas, without understanding the peculiarities of minds and the stagnation between them. As a result, this knowledge is incorrectly or incorrectly interpreted in specific physical situations.

In modern minds, the process of learning physics at most initial stages is a complex task, since many students are not prepared before acquiring new information. They don't know how to identify food, explain the safety of boxes, handle equipment, don't know fundamental physical laws, etc. Connected with this is the role of the student, who is responsible for creating the minds for the development of creativity, learning interests, and intellectual abilities of students, focusing on humanization, differentiation, and Individualization begins.

To prepare a competent specialist, competitive, who has experimental knowledge and skills, who is able to operate with current terminology and new developments, scientific concepts, laws, concepts, traditions and theories of natural sciences, it is necessary to ensure a high level of fundamental training as the basis of professional competencies. The connection of physical tasks is an element in the formation of professional competencies of students. This process contributes to the acquisition of not only theoretical knowledge, but also the development of practical skills, critical thinking and the development of knowledge in real minds (Burhun, 2016).

Key words: Professional competence, critical thinking, task development.

Актуальність проблеми. Фізика, як фундаментальна наука, має величезний вплив на формування професійної компетентності майбутніх спеціалістів у різних галузях (Войтків, 2016). Вона забезпечує базу для розвитку критичного мислення, аналітичних здібностей та

практичних навичок, які необхідні для вирішення прикладних завдань і створення нових технологій. Велике значення при цьому відіграють фізичні задачі: їх постановка, аналіз і, безперечно, розв'язок. Для успішного розв'язання задачі необхідно вміти виділяти головне,

вибирати відповідні формули та проводити необхідні розрахунки, що допомагає розвинути фізичну інтуїцію, тобто здатність передбачати результати експериментів або процесів, не вдаючись до складних розрахунків (Яцура, 2021). Таким чином, процес розв'язування задач з фізики являє собою комплексний розвиток особистості, який формує в студента важливі професійні компетентності, необхідні для успішної роботи в будь-якій сфері діяльності.

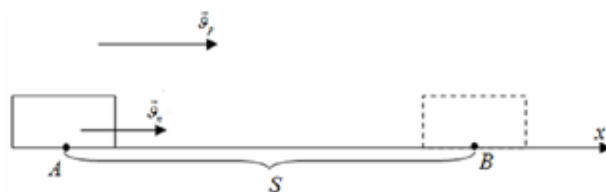
Мета дослідження – розглянути розв'язок типових задач з фізики, що сприяють розвитку професійних компетентностей студентів.

Виклад основного матеріалу. Фізика створює універсальну базу для вивчення загальнопрофесійних і спеціальних дисциплін, дає цілісне уявлення про фізичні закони навколишнього світу в їх єдинстві і взаємозв'язку, що сприяє вирішенню науково-технічних завдань в теоретичних і прикладних аспектах. У зв'язку із скороченням годин, виділених на вивчення фізики у ВНЗ, важливо раціонально і ефективно використовувати аудиторний час на вивчення курсу. Важливе місце в освітньому процесі займає розв'язання фізичних завдань, як одна з найбільш ефективних форм поглибленого вивчення, закріплення теоретичного матеріалу та розвитку мислення здобувачів освіти. Проте при невеликій кількості занять в семестрі неможливо сформулювати необхідні вміння і навички, тому необхідно викладачу використовувати нові підходи для пояснення навчального матеріалу. Знання повинно стати для студентів не просто засобом для отримання оцінок, а самостійною цінністю, необхідною для пізнання навколишнього світу. Здобувач освіти повинен бути готовим до вирішення таких завдань, як засвоєння методів наукових досліджень, моделей, теорій, участь у проведенні фізичних досліджень, участь в обробці отриманих результатів наукових досліджень на сучасному рівні (Герасимова, 2021). У зв'язку із цим основу професійних і загальнокультурних компетентностей складають вміння, пов'язані з використанням різних методик фізичних вимірювань, методів фізичного і математичного моделювання, а також розв'язувати фізичні задачі.

Лабораторні роботи є невід'ємною частиною процесу навчання фізики, адже вони поєднують

теоретичні знання з практичними навичками (Кевшин, 2023; Кевшин, 2023). Проте, при вивченні того чи іншого розділу з фізики не завжди є можливість продемонструвати студентам експеримент для кращого засвоєння ними нового матеріалу. У цьому випадку варто використовувати цікаві задачі, розв'язок яких розкривав би сутність розглядуваної проблеми. Наприклад, при вивченні розділу «Механіка» доречно запропонувати здобувачам освіти задачу на знаходження середньої швидкості. Розв'язок задачі варто супроводжувати рисунками.

Задача. Пароплав плыв річкою від А до В зі швидкістю 15 км/год відносно берега, а назад – зі швидкістю 10 км/год. Знайти середню швидкість пароплава та швидкість течії річки.



Нехай відстань між точками А і В рівна S . Запишемо вираз для середньої $\langle \vartheta_n \rangle$ швидкості пароплава:

$$\langle \vartheta_n \rangle = \frac{S + S}{t_1 + t_2} = \frac{2S}{t_1 + t_2}$$

де t_1 – час руху пароплава від А до В; t_2 – час руху пароплава від В до А.

Запишемо вирази для t_1 і t_2 :

$$t_1 = \frac{S}{\vartheta_1}, \quad t_2 = \frac{S}{\vartheta_2}.$$

Тоді:

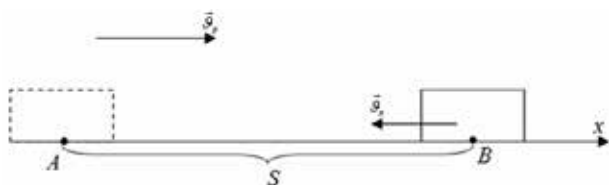
$$\langle \vartheta_n \rangle = \frac{2S}{\frac{S}{\vartheta_1} + \frac{S}{\vartheta_2}} = \frac{2S}{S \left(\frac{1}{\vartheta_1} + \frac{1}{\vartheta_2} \right)} = \frac{2S}{S \left(\frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{\vartheta_1 \vartheta_2} \right)} = \frac{2\vartheta_1 \vartheta_2}{\vartheta_1 + \vartheta_2}.$$

Розглянемо випадок, коли пароплав рухається від А до В за течією річки:

$$\vartheta_n + \vartheta_p = \vartheta_1,$$

де ϑ_n – швидкість пароплава відносно води; ϑ_1 – швидкість пароплава відносно берега; ϑ_p – швидкість течії річки.

Розглянемо випадок, коли пароплав рухається від В до А проти течії річки:



Для цього випадку можемо записати:

$$\vartheta_p - \vartheta_n = -\vartheta_2,$$

де ϑ_2 – швидкість пароплава відносно берега для цього.

З останніх виразів можемо записати:

$$\vartheta_n + \vartheta_p + (\vartheta_p - \vartheta_n) = \vartheta_1 + (-\vartheta_2).$$

Звідси:

$$\vartheta_p = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{2}.$$

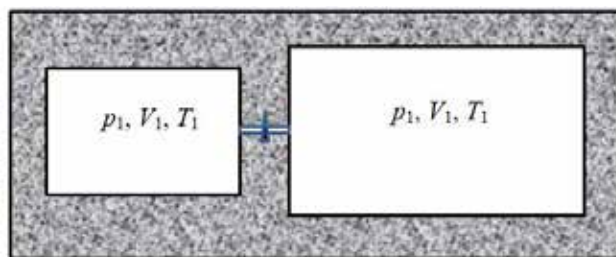
Підставивши значення, отримуємо:

$$<\vartheta_n> = \frac{2 \cdot 15 \cdot 10}{15 + 10} = 12 \frac{\text{км}}{\text{год}}, \quad \vartheta_p = \frac{15 - 10}{2} = 2,5 \frac{\text{км}}{\text{ч}}.$$

Молекулярна фізика дає можливості для розвитку пізнавальних та творчих здібностей студентів, основою яких є знання про теплоту, фізичні явища та закони, агрегатні стани речовин та фазові перетворення – кристалізація, плавлення, конденсація, випаровування та явища, які відбуваються на межі між речовинами, що знаходяться у різних агрегатних станах. Вона тісно пов'язана з термодинамікою, одним із фундаментальних понять якої є ентропія. Ентропія – одна з ключових і водночас найбільш складних для розуміння фізичних концепцій, без яких важко уявити сучасну наукову картину світу. Вона є невід'ємною характеристикою макроскопічних систем, але, на відміну від таких параметрів, як температура, тиск або об'єм, її неможливо легко виміряти за допомогою приладів. Водночас ентропія є фундаментальним поняттям, яке дає змогу зрозуміти, як енергія розширюється і трансформується, чому природні процеси відбуваються саме так, а не інакше, і як невідповідність змінюється з часом. Розуміння ентропії відкриває шлях до глибшого аналізу фізичних явищ та їх моделювання в науці й техніці. На нашу думку, краще допоможе зрозуміти здобувачам освіти суть цього поняття розв'язок наступної задачі.

Задача. Два балони об'ємами 1 м^3 та 11 м^3 з'єднуються трубою з краном. У першому балоні знаходиться 1 кг повітря при температурі

1°C , у другому 36 кг повітря при температурі 60°C . Знайдіть зміну ентропії системи після відкриття крану та досягнення рівноваги, якщо система знаходиться у термостаті.



Змішування газів із двох балонів – необоротний процес. Щоб обчислити зміну ентропії ΔS , треба знайти відповідний оборотний процес, що пов'язує початковий і кінцевий стан системи. Результат, як відомо, не залежить від процесу, оскільки dS є повним диференціалом. Зручно розглянути такі дві частини процесу: 1) розширення кожного з газів до об'єму $V = V_1 + V_2$ при постійній температурі; 2) вирівнювання температур при постійному об'ємі. Тоді повний диференціал dS ентропії ідеального газу дорівнюватиме:

$$dS = \frac{m}{M} R \frac{dV}{V} + \frac{m}{M} C_v \frac{dT}{T} \quad (1)$$

де M – молярна маса газу; m – маса газу; $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – універсальна газова стала, $C_v = \frac{R}{\gamma - 1} = \frac{8,31}{1,4 - 1} = 20,79 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ – молярна теплоємність повітря при постійному об'ємі. Перший член в останньому рівнянні обумовлений тільки розширенням газу, другий – тільки вирівнюванням температур.

Співвідношення (1) справедливе для кожної маси газів, тому елементарна зміна ентропії при змішуванні газів рівна:

$$dS = dS_1 + dS_2 = \frac{m_1}{M} R \frac{dV}{V} + \frac{m_1}{M} C_v \frac{dT}{T} + \frac{m_2}{M} R \frac{dV}{V} + \frac{m_2}{M} C_v \frac{dT}{T}.$$

Звідси:

$$\Delta S = \frac{m_1}{M} R \int_{V_1}^V \frac{dV}{V} + \frac{m_1}{M} C_v \int_{T_1}^T \frac{dT}{T} + \frac{m_2}{M} R \int_{V_2}^V \frac{dV}{V} + \frac{m_2}{M} C_v \int_{T_2}^T \frac{dT}{T} = \frac{m_1}{M} R \ln \frac{V}{V_1} + \frac{m_1}{M} C_v \ln \frac{T}{T_1} + \frac{m_2}{M} R \ln \frac{V}{V_2} + \frac{m_2}{M} C_v \ln \frac{T}{T_2}$$

Враховуючи, що $V = V_1 + V_2$, останній вираз прийме вигляд:

$$\Delta S = \frac{m_1}{M} R \ln \frac{V_1 + V_2}{V_1} + \frac{m_1}{M} C_V \ln \frac{T}{T_1} + \frac{m_2}{M} R \ln \frac{V_1 + V_2}{V_2} + \frac{m_2}{M} C_V \ln \frac{T}{T_2} \quad (2)$$

Кінцеву температуру T в результаті вирівнювання температур знайдемо з рівняння теплового балансу:

$$Q_1 + Q_2 = 0,$$

де Q_1 і Q_2 – кількість теплоти, отриманої (відданої) газом у першому та другому балоні, відповідно. При цьому:

$$Q_1 = m_1 c_V (T - T_1), \quad Q_2 = m_2 c_V (T - T_2),$$

де c_V – питома теплоємність повітря при постійному об'ємі.

З останніх виразів знаходимо:

$$T = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2}{m_1 + m_2}.$$

Розрахунки за останнім виразом дають значення $T = 331,4 \text{ K}$. Тоді, підставляючи дані у вираз (2), одержуємо, $\Delta S = 1620 \frac{\text{Дж}}{\text{K}}$.

Головна проблема сучасного навчання фізики у вищих навчальних закладах полягає у різнобічному особистісному становленні студента, який прагне розвитку та може застосовувати отримані знання на практиці, ефективно користуючись ними у повсякденному житті (Макаренко, 2020). У зв'язку із цим вивчення розділу «Електрика» є надзвичайно важливим для здобувачів освіти, оскільки цей розділ фізики має широкий вплив на науково-технічний прогрес, побут, і розуміння навколишнього світу. Вивчення електричних та магнітних явищ закладає фундамент для розуміння природних процесів, становлять базу для технічних спеціальностей, сприяють практичному застосуванню сучасних пристроїв, розвитку критичного мислення та підготовки до професій, що формують майбутнє. В курсі електрики велика увага приділяється поняттю електростатичного поля, однією з характеристик якого є напруженість $\vec{E}$, розуміння якої часто викликає труднощі у студентів. При поглибленому викладанні фізики має бути використана теорема Остроградського-Гауса, яка допомагає більш раціонально проводити розрахунки

напруженості електричних полів при розподілі зарядів у просторі певним симетричним чином. Для кращого розуміння особливості застосування даної теореми доцільно запропонувати розв'язок наступної задачі.

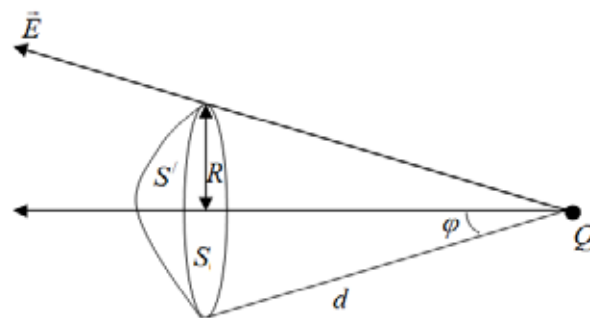
Задача. Заряд 1 мкКл рівновіддалений від країв круглої площадки на відстань 20 см , радіус якої 12 см . Визначити середнє за модулем значення напруженості поля в межах площадки.

Відповідно до теореми Остроградського – Гауса можемо записати:

$$\Phi = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i Q_i,$$

де $\oint_S \vec{E} d\vec{S}$ – потік вектора напруженості електричного поля через замкнуту поверхню; $\sum_i Q_i$ – сума зарядів, що знаходяться всередині поверхні; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$ – електрична стала.

Щоб отримати замкнуту поверхню, доповнимо круглу площадку площею S частиною сферичної поверхні S' радіусом d .



Оскільки поверхня S не охоплює заряд Q , то всередині цієї поверхні зарядів немає, тому $\sum_i Q_i = 0$.

Потік Φ складається з потоку Φ_S через поверхню S круглої площадки та потоку $\Phi_{S'}$ через сферичну поверхню S' . У кожній точці поверхні вектор напруженості спрямований нормалі до поверхні сфери, тому $\alpha = 0^\circ$, $\cos 0^\circ = 1$, відповідно $\Phi = 0$. Тоді можемо записати:

$$\Phi = \Phi_S + \Phi_{S'} = 0, \quad \Phi_S = -\Phi_{S'} = ES'.$$

Запишемо вираз для площі сферичної поверхні радіусом d :

$$S' = 2\pi d(1 - \cos\phi).$$

Враховуючи, що $E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 d^2}$, $\cos\phi = \frac{\sqrt{d^2 - R^2}}{d}$, то остаточно одержуємо:

$$\Phi_s = -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 d^2} 2\pi d^2 \left(1 - \frac{\sqrt{d^2 - R^2}}{d}\right) = -\frac{Q}{2\epsilon_0} \left(1 - \frac{\sqrt{d^2 - R^2}}{d}\right).$$

Відповідно середнє за модулем значення напруженості поля в межах площадки S рівне:

$$E = \frac{\Phi_s}{S} = \frac{\frac{Q}{2\epsilon_0} \left(1 - \frac{\sqrt{d^2 - R^2}}{d}\right)}{\pi R^2} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 R^2} \left(1 - \frac{\sqrt{d^2 - R^2}}{d}\right)$$

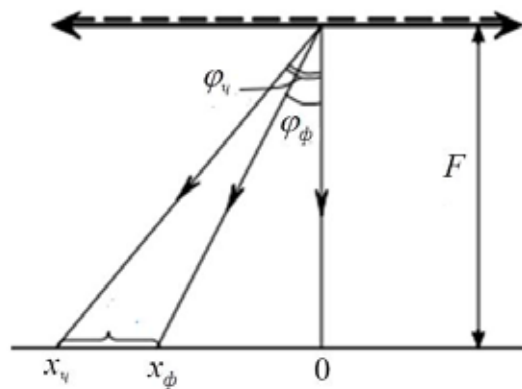
Підставивши дані, одержимо $E = 25 \cdot 10^4 \frac{B}{м}$.

Оптика відіграє надзвичайно важливу роль у житті сучасної людини. Важко уявити повсякденне існування без цієї галузі фізики. На Землі й у космосі працюють численні прилади та пристрої, створення яких стало можливим завдяки знанню законів оптики. Ці технології роблять наше життя комфортнішим і легшим, відкривають можливості для дослідження довкілля та отримання нових знань, а також сприяють подальшому прогресу науки і техніки. Тому вивчення даного розділу є важливим не лише для розуміння базових понять, які використовуються в інших спеціальних науках, але й для формування цілісного уявлення про ключові наукові принципи сучасної оптики.

Одним із найбільш поширених явищ, яке має значний вплив на наше життя та широко застосовується в багатьох сферах, таких як оптика, астрономія, техніка тощо є дифракція. На застосуванні цього явища працюють багато технічних пристроїв. Зокрема, у спектральних приладах високого класу, замість призм застосовують дифракційні ґратки, що являють собою періодичні структури, вигравірувані спеціальною ділільною машиною на поверхні скляної або металевої пластинки. Такий пристрій дозволяє розкласти світло на складові кольори (спектр). Для кращого розуміння цього явища, доцільно розглянути розв'язок наступної задачі.

Задача. На дифракційну ґратку, стала якої 4 мкм, нормально падає пучок білого світла. Визначити протяжність видимої ділянки спектра першого порядку, спроектованого на екран лінзою з фокусною відстанню 50 см. Довжини хвиль меж видимого світла прийняти рівними 380 нм і 760 нм.

На рисунку нижче показано $\phi_\square$ – кут відхилення фіолетових променів; ϕ_ϕ – червоних променів; x_ϕ – відстань від центрального максимуму до фіолетової лінії першого порядку;



x_ϕ – до червоної лінії; Δx – ширина діапазону першого порядку.

З формули дифракційної ґратки можемо записати:

$$\sin \phi = \frac{k\lambda}{d},$$

де d – період дифракційної ґратки; ϕ – кут, між напрямком на дифракційний максимум і нормаллю до ґратки; $k = 0, 1, 2, \dots$ – порядок максимуму; λ – довжина хвилі.

Вважаючи кути дифракції першого порядку малими, можна прийняти $\sin \phi \approx \text{tg} \phi$. Тоді:

$$\text{tg} \phi = \frac{k\lambda}{d}.$$

З рисунку знаходимо:

$$x_\phi = F \text{tg} \phi_\phi, \quad x_\phi = F \text{tg} \phi_\phi,$$

де F – фокусна відстань лінзи.

Тоді протяжність видимої ділянки спектра Δx буде рівна:

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_\phi - x_\phi = F \text{tg} \phi_\phi - F \text{tg} \phi_\phi = \\ &= F (\text{tg} \phi_\phi - \text{tg} \phi_\phi) = F \left(\frac{k\lambda_\phi}{d} - \frac{k\lambda_\phi}{d} \right) = \frac{kF}{d} (\lambda_\phi - \lambda_\phi). \end{aligned}$$

Підставивши дані в останній вираз знаходимо $\Delta x = 4,75 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

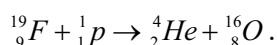
Сьогодні будь-яка освічена людина має повне розуміння як про сприятливі сторони використання явища радіоактивності – наприклад, в ядерній індустрії, медицині, так і негативних, пов'язаних із забрудненням довкілля та нанесенням загрози життю та здоров'ю людини і всьому живому на планеті. Ми проживаємо в умовах безкінечних випромінювань різних видів. Природний радіаційний фон пронизує все, що живе на Землі та її надрах. Тому слід правильно розуміти, що таке радіація. Малі

доза радіоактивного випромінювання безпечні, переносяться людиною без критичних наслідків, великі дози радіації, на жаль, можуть призвести до негативних наслідків.

Вивчення атомної та ядерної фізики має велике значення для студентів, адже сприяє формуванню у них фундаменту сучасних технологій, енергетики та медицини, дозволяє засвоїти базові закони природи: структуру матерії, енергетичні процеси, взаємодію частинок, що є основою для розуміння від будови атомів до глобальних явищ, таких як термоядерні реакції. Також це є важливою ланкою у формуванні у здобувачів освіти цілісного погляду на мікросвіт, уявлення про фізичну картину світу, як основу цілісності та різноманіття природи. Проте, якщо вивчення інших областей фізики простіше забезпечити проведенням експериментів з відповідних тем, то у випадку атомної та ядерної фізики це завжди проблематично. Тому розв'язування задач з розділу «Атомна і ядерна фізика» допоможе студентам усвідомити сутність та закономірності явища радіоактивності, освоїти вміння визначати склад та характеристики атомних ядер, знаходити масу та енергію зв'язку ядра, ядерних реакцій. Розглянемо особливості розв'язання наступної задачі.

Задача. Запишіть у розгорнутому виді ядерну реакцію ${}^{19}_9F(p, \alpha){}^{16}_8O$ та знайдіть її енергетичний вихід.

Запишемо рівняння ядерної реакції в загальному вигляді:



Енергетичний вихід реакції рівний:

$$Q = \Delta mc^2.$$

Енергетичний вихід реакції визначимо формулою:

$$Q = \Delta mc^2,$$

де Δm – різниця між масами частинок до та після реакції; $c = 3 \cdot 10^8 \frac{M}{c}$ – швидкість світла у вакуумі.

Різниця дефектів мас лівої та правої частин реакції рівна:

$$\Delta m = m_{{}^{19}_9F} + m_{{}^1_1p} - m_{{}^4_2He} - m_{{}^{16}_8O}.$$

Тоді:

$$Q = (m_{{}^{19}_9F} + m_{{}^1_1p} - m_{{}^4_2He} - m_{{}^{16}_8O})c^2.$$

Щоб визначити енергію в МеВ, останню формулу запишемо так:

$$Q = 931,5 \cdot (m_{{}^{19}_9F} + m_{{}^1_1p} - m_{{}^4_2He} - m_{{}^{16}_8O}).$$

Враховуючи, що $m_{{}^{19}_9F} = 18,998403 \text{ а.о.м.}$, $m_{{}^1_1p} = 1,00783 \text{ а.о.м.}$, $m_{{}^4_2He} = 4,00260 \text{ а.о.м.}$, $m_{{}^{16}_8O} = 15,99491 \text{ а.о.м.}$, одержимо $Q = 8,1 \text{ МеВ}$ або $Q = 1,3 \cdot 10^{-12} \text{ Дж.}$

Висновки. Розв'язання задач з фізики має велике практичне значення. Воно дозволяє закріпити теоретичний матеріал, сприяючи формуванню нових понять та свідомому засвоєнню фізичних законів, знайомити здобувачів освіти із практичним застосуванням фізичних знань, навчитися слідувати логічним операціям для вирішення професійно орієнтованої проблеми, вибудовувати математичні моделі для подальшого вирішення ситуаційного завдання. Аналіз та розв'язок фізичних задач дозволяють зрозуміти та запам'ятати основні закони та формули з фізики, створюють уявлення про їх характерні особливості та межі застосування, розвиває логічне мислення, кмітливість, творчу фантазію, вміння застосовувати теоретичні знання для пояснення явищ природи, є найкращим критерієм оцінки глибини вивчення програмного матеріалу та його засвоєння.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Яцура М. М., Гамарник А. М., Рачій Б. І. Методика проведення практичних занять з фізики зі студентами фізичних спеціальностей при кредитно-модульній системі організації навчання. *Фізико-математична освіта*. 2021. Вип. 1(27). С. 112–118.
2. Герасимова К. В., Ткаченко Г. І. Практичні заняття з фізики із залученням демонстрацій у закладах вищої освіти. *Фізико-математична освіта*. 2021. Вип. 4(30). С. 29–33.
3. Бургун І. В. Класифікація фізичних задач в контексті компетентнісної освіти. *Наукові записки. Серія : Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти*. 2016. Вип. 10, Ч. III. С. 35–38.
4. Войтків Г. В. Компетентнісні задачі з фізики. *Фізика. Технології навчання. Зб. наук. пр. студентів і молодих науковців*. М. Кіровоград, 2016. В. 14. С. 45–50.

5. Макаренко О. В., Макаренко К. С., Макаренко В. І., Матяш Л.О., Сілкова О. В. Методика складання задач з медичної і біологічної фізики в контексті сучасних педагогічних технологій. *Фізико-математична освіта*. 2020. Вип. 4(26). С. 67–71.

6. Кевшин А., Галян В., Третьак А., Артюх Ю., Шафарчук В., Никифоров О., Куршель Д. Використання практичних та лабораторних занять під час вивчення складних лінійних електричних кіл постійного струму в курсі електротехніки. *Фізика та освітні технології*. 2022. № 1. С. 27–33.

7. Кевшин А., Галян В., Остапчук В., Димарчук В., Середа, Д. Особливості використання панелі «Лінійні електричні кола» стенду «Електротехніка. Основи електроніки УТЛЕ-01» для експериментальної перевірки принципу накладання струмів. *Фізика та освітні технології*. 2023. № 2. С. 13–19.

REFERENCES:

1. Yatsura, M. M., Hamarnyk, A. M., & Rachii, B. I. (2021). Metodyka provedennia praktychnykh zaniat z fizyky zi studentamy fizychnykh spetsialnostei pry kredytno-modulnii systemi orhanizatsii navchannia [Methodology of Conducting Practical Physics Classes for Students of Physical Specialties within the Credit-Module System of Educational Organization]. *Fizyko-matematychna osvita*, Vyp. 1(27). S. 112–118.

2. Herasymova, K. V., & Tkachenko, H. I. (2021) Praktychni zaniattia z fizyky iz zaluchenniam demonstratsii u zakladakh vyshchoi osvity [Practical Physics Classes Involving Demonstrations in Higher Education Institutions]. *Fizyko-matematychna osvita*. Vyp. 4(30). S. 29–33.

3. Burhun, I. V. (2016). Klasyfikatsiia fizychnykh zadach v konteksti kompetentnisnoi osvity [Classification of Physics Problems in the Context of Competence-Based Education. Scientific Notes]. *Naukovi zapysky. Serii: Problemy metodyky fizyko-matematychnoi i tekhnolohichnoi osvity*. Vyp. 10, Ch. III. S. 35–38.

4. Voitkiv, H. V. (2016). Kompetentnisni zadachy z fizyky. Fizyka. Tekhnolohii navchannia [Competency-Based Physics Problems. Physics. Learning Technologies]. *Zb. nauk. pr. studentiv i molodykh naukovtsiv. M. Kirovohrad. V. 14*. S. 45–50.

5. Makarenko, O. V., Makarenko, K. S., Makarenko, V. I., Matiash, L. O., & Silkova, O. V. (2020). Metodyka skladannia zadach z medychnoi i biolohichnoi fizyky v konteksti suchasnykh pedahohichnykh tekhnolohii [Methodology of Designing Problems in Medical and Biological Physics in the Context of Modern Pedagogical Technologies]. *Fizyko-matematychna osvita*. Vyp. 4(26). S. 67–71.

6. Kevshyn, A., Halian, V., Tretiak, A., Artiukh, Yu., Shafarchuk, V., Nykyforov, O., & Kurshel, D. (2022). Vykorystannia praktychnykh ta laboratornykh zaniat pid chas vyvchennia skladnykh liniinykh elektrychnykh kil postiinoho strumu v kursy elektrotekhniki [The Use of Practical and Laboratory Classes in Studying Complex Direct Current Linear Electrical Circuits in the Course of Electrical Engineering]. *Fizyka ta osviti tekhnolohii*. № 1. S. 27–33.

7. Kevshyn, A., Halian, V., Ostapiuk, V., Dymarchuk, V., & Sereda, D. (2023). Osoblyvosti vykorystannia paneli «Liniini elektrychni kola» stendy «Elektrotekhnika. Osnovy elektroniky UTLE-01» dlia eksperymentalnoi perevirky pryntsyphu nakladannia strumiv [Peculiarities of Using the “Linear Electrical Circuits” Panel of the “Electrical Engineering. Fundamentals of Electronics UTLE-01” Stand for Experimental Verification of the Superposition Principle of Currents.]. *Fizyka ta osviti tekhnolohii*. № 2. S. 13–19.

УДК 378.147:621.3

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-5>

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, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/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, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0066-7174>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422525700

Олексій НОВОСАД

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, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9433-7776>

SCOPUS AUTHOR ID: 55595635700

Назар КЕВШИН

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-9932-8447>

Андрій СЕМЕНЮК

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-3433-9833>

Бібліографічний опис статті: Кевшин, А., Гальян, В., Новосад, О., Кевшин, Н., Семенюк, А. (2025). Особливості проведення лабораторних занять з курсу «Основи електроніки» при вивченні явища резонансів в електричних колах змінного струму. *Фізика та освітні технології*, 1, 39–46, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-5>

ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ З ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ЯВИЩ У ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ЗМІННОГО СТРУМУ

Сучасний етап розвитку освіти характеризується широким впровадженням у професійну педагогічну діяльність інформаційних технологій, які забезпечують вихід системи освіти на якісно новий рівень за рахунок ефективного використання електронних освітніх ресурсів. Зростання швидкості зміни наукомістких технологій у галузі електроніки виводить на перший план необхідність реалізації такого навчання електротехнічним дисциплінам, зміст якого полягає не так у передачі знань, а як у підготовці випускників університетів з переважною орієнтацією на розвиток високої професійної компетентності. Вивчення основ електроніки є надзвичайно важливим для майбутніх вчителів, особливо у сучасному світі, де технології швидко розвиваються і активно інтегруються в освітній процес. Майбутній вчитель, знайомий з основами електроніки, краще орієнтується у сучасному технічному середовищі. Це дозволяє йому розуміти принципи роботи електронних пристроїв, які використовую-

ються в освіті (наприклад, інтерактивних дошок, лабораторного обладнання, комп'ютерів), використовувати технології для підвищення ефективності навчання.

Електроніка є важливою складовою STEM-освіти. Майбутні вчителі, які володіють основами цієї дисципліни, можуть організовувати цікаві заняття з елементами робототехніки, програмування або конструювання електронних схем, мотивувати учнів до вивчення технічних наук. Навички роботи з електронікою сприяють розвитку логічного мислення і розуміння причинно-наслідкових зв'язків, здатності вирішувати технічні проблеми та застосовувати знання на практиці.

Сучасний вчитель повинен йти в ногу з часом і знати, як використовувати нові електронні інструменти та пристрої. Наприклад, використання Arduino чи Raspberry Pi для проведення інтегрованих уроків, навчання учнів створенню простих електронних проєктів. Вчителі, які володіють основами електроніки, більш цінні на ринку праці, оскільки можуть виконувати не лише освітню, але й технічну функцію. Вони здатні вести факультативи, гуртки або спецкурси, пов'язані з сучасними технологіями. Базові знання електроніки дозволяють викладати правила безпечного використання електроприладів, запобігати небезпеці та розвивати у дітей свідоме ставлення до роботи з технікою.

Ключові слова: резонанс струмів, резонанс напруг, активний опір, індуктивний та ємнісний опір, електричне коло.

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: <https://orcid.org/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: <https://orcid.org/0000-0003-0066-7174>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422525700

Oleksii NOVOSAD

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: <https://orcid.org/0000-0002-9433-7776>

SCOPUS AUTHOR ID: 55595635700

Nazar KEVSHYN

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: <https://orcid.org/0009-0009-9932-8447>

Andriy SEMENYUK

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: <https://orcid.org/0009-0001-3433-9833>

To cite this article: Kevshyn, A., Halyan, V., Novosad, O., Kevshyn, N., Semenyuk, A. (2025). Osoblyvosti provedennia laboratornykh zaniat z kursu «Osnovy elektroniky» pry vyvchenni yavlyshcha rezonansiv v elektrychnykh kolakh zminnoho strumu [Features of conducting laboratory lessons from the basics of electronics course when studying the phenomenon of resonances in ac electric circuits]. *Physics and Educational Technology*, 1, 39–46, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-5>

FEATURES OF CONDUCTING LABORATORY CLASSES ON THE RESEARCH OF RESONANCE PHENOMENA IN ELECTRICAL CIRCUITS OF ALTERNATING CURRENT

The modern stage of education development is characterized by the wide introduction of information technologies into professional pedagogical activity, which ensure the education system reaches a qualitatively new level due to the effective use of electronic educational resources. The increasing speed of change in science-intensive technologies in the field of electronics brings to the fore the need to implement such training in electrical engineering disciplines, the content of which is not so much in the transfer of knowledge, but rather in the preparation of university graduates with a predominant focus on the development of high professional competence. Learning the basics of electronics is extremely important for future teachers, especially in today's world, where technology is rapidly developing and actively integrated into the educational process. A future teacher who is familiar with the basics of electronics is better oriented in the modern technical environment. This allows him to understand the principles of operation of electronic devices used in education (for example, interactive whiteboards, laboratory equipment, computers), to use technology to improve the effectiveness of education.

Electronics is an important component of STEM education. Future teachers who know the basics of this discipline can organize interesting classes with elements of robotics, programming or designing electronic circuits, motivate students to study technical sciences. The skills of working with electronics contribute to the development of logical thinking and understanding of cause and effect relationships, the ability to solve technical problems and apply knowledge in practice.

A modern teacher must keep up with the times and know how to use new electronic tools and devices. For example, using Arduino or Raspberry Pi for integrated lessons, teaching students to create simple electronic projects. Teachers who know the basics of electronics are more valuable in the labor market because they can perform not only an educational but also a technical function. They are able to conduct electives, groups or special courses related to modern technologies. Basic knowledge of electronics allows you to teach the rules of safe use of electrical appliances, prevent danger, and develop a conscious attitude to work with technology in children.

Key words: resonance of currents, resonance of voltages, active Lpir, inductive and capacitive resistance, electric circuit.

Актуальність проблеми. Сучасні діти надзвичайно рано стикаються з електричними явищами та електротехнічними пристроями: освітлювальними та нагрівальними пристроями, засобами для приготування їжі, з електрифікованими іграшками, які їх найбільше цікавлять. Тому вивчення основ електроніки є важливим елементом підготовки сучасних педагогів, адже це дає їм змогу бути інноваційними, технічно грамотними та ефективними у викладанні. Такі знання сприяють не лише професійному зростанню вчителя, але й розвитку сучасних учнів, які живуть у світі технологій.

Мета дослідження – на основі розроблених лабораторних робіт розглянути особливості вивчення явища резонансу струмів та напруг в електричних колах змінного струму.

Виклад основного матеріалу. Головною тенденцією розвитку промисловості в даний час є стрімке зростання кількості електричних та електронних систем, а також сфер їх використання. Усі без винятку галузі народного господарства використовують у процесі роботи електричну енергію, тому якісна підготовка з основ електроніки майбутніх працівників у процесі навчання в ВНЗ є невід’ємним елементом їхньої професійної компетентності, безпосередньо

визначальним конкурентоспроможність випускників на ринку праці.

Основи електротехнічної підготовки бакалаврів галузі знань 01 освіта / Педагогіка, спеціальності 014.15 Середня освіта (Природничі науки), за освітньою програмою Середня освіта. Природничі науки Волинського національного університету імені Лесі Українки закладаються у процесі вивчення освітнього компоненту «Основи електроніки». Цей курс має на меті ознайомити здобувачів освіти з будовою, ключовими фізичними принципами роботи та практичним застосуванням напівпровідникових приладів та електронних пристроїв, створених на їх основі. Студенти мають можливість вивчити елементи сучасної аналогової та цифрової електроніки, а також основні концепції та схеми, що забезпечують роботу цифрових радіо-, теле- та комп’ютерних систем, і ознайомитися з тенденцією їх розвитку.

Вивчення курсу «Основи електроніки» передбачено на другому році навчання (третьій семестр). Аудиторну частину дисципліни традиційно формують лекційні заняття та лабораторні роботи, решта часу (порядку 3/5 від загального обсягу годин на курс) виділяється на самостійну роботу студентів. Саме

найбільш важливим аспектом при вивченні даного освітнього компонента є виконання лабораторних робіт, на яких здобувачі освіти набувають навички роботи з електрообладнанням та контрольно-вимірювальними приладами, які є необхідними в майбутній професійній діяльності.

Вивчення резонансу струмів і напруг є винятковим результатом для студентів, оскільки це сприяє розумінню ними основ роботи електричних систем. Резонанс є фундаментальним явищем у багатьох електричних і електронних системах, включаючи генератори, фільтри, передавальні лінії та антени. Дане явище активно застосовується в радіотехнічних пристроях, основою яких є коливальні контури – електричні схеми, що включають котушку індуктивності та конденсатор. Якщо реактивні елементи з'єднані послідовно, контур називають послідовним, а у випадку паралельного з'єднання – паралельним (Кевшин, 2018).

Індуктивний та ємнісний опори в колі змінного струму можуть повністю компенсувати один одного, що призводить до резонансу в колі. У стані резонансу опір кола стає виключно активним, напруга і струм перебувають у фазі, а коефіцієнт потужності $\cos\varphi=1$. Резонанс можна досягти, змінюючи частоту джерела, індуктивність, ємність або їх поєднання. Кутова частота ω , за якої виникає резонанс, називається резонансною або власною кутовою частотою ω_0 (Кевшин, 2021).

Резонанс напруг виникає в послідовному RLC-контурі, коли частота ω джерела живлення дорівнює резонансній частоті ω_0 (рис. 1).

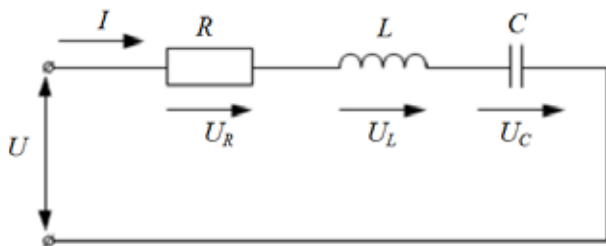


Рис. 1. Послідовне з'єднання активного та реактивних опорів

У цьому випадку індуктивний та ємнісний опори (X_L та X_C) рівні за величиною, але протилежні за знаком, тому їх сума, тобто реактивний опір, стає нульовою:

$$X = X_L - X_C = 0.$$

Оскільки $X_L = \omega L$, а $X_C = \frac{1}{\omega C}$, то:

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}.$$

Отже, резонансна частота буде рівна:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Напруги на котушці U_L і на конденсаторі U_C перебувають у протифазі та взаємно компенсуються (рис. 2).

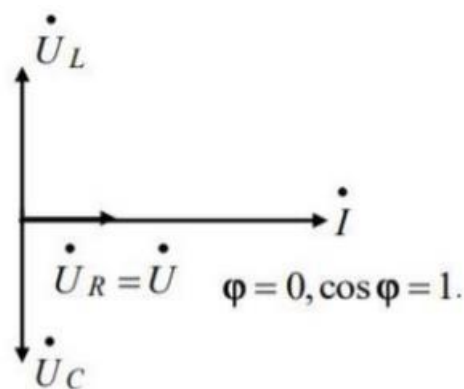


Рис. 2. Векторна діаграма при резонансі напруг

Повний опір контуру зводиться до активного опору R , що призводить до зростання струму в контурі та збільшення напруги на його елементах. Закон Ома для цього випадку набуває форми:

$$I = \frac{U}{R}$$

Якщо активний опір зменшується, струм може значно зрости, а зі збільшенням R струм зменшується, що послаблює ефект резонансу (рис. 3):

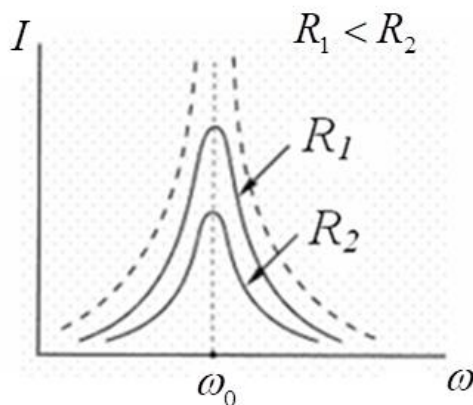


Рис. 3. Вигляд резонансних кривих при різних значеннях активного опору.

При резонансі напруги U_L і U_C можуть значно перевищувати напругу джерела живлення, що створює ризик пошкодження контуру (Співак, 2020).

Резонанс струмів спостерігається в паралельному RLC-колі, де котушка з резистором і конденсатор з'єднані паралельно (рис. 4).

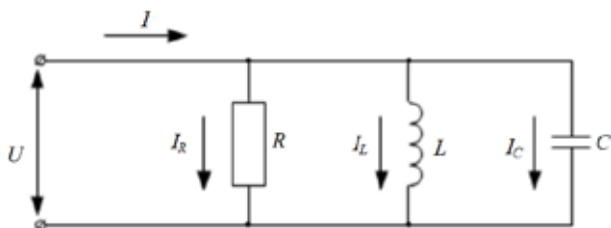


Рис. 4. Паралельне з'єднання активного та реактивних опорів.

У цьому випадку, під час резонансу ємнісна та індуктивна провідності стають рівними:

$$b_C = b_L.$$

Або:

$$\omega_0 C = \frac{1}{\omega_0 L},$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Як видно, формула для резонансної частоти аналогічна до тієї, що застосовується у випадку резонансу напруги.

Векторна діаграма при резонансі струмів зображена на рис. 5. При цьому коло веде себе як таке, що містить тільки активний опір, а обмін реактивною енергією відбувається тільки між котушкою індуктивності і конденсатором, а від генератора в коло поступає лише одна активна енергія, яка поглинається активним опором.

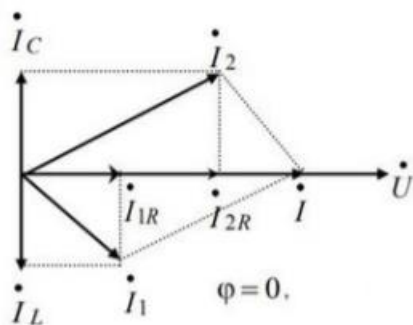


Рис. 5. Векторна діаграма при резонансі струмів

Зсув фаз між повним струмом і напругою в колі рівний нулю ($\varphi=0$), відповідно $\cos\varphi=1$. Струм у нерозгалуженій ділянці кола може бути значно меншим за струми, що протікають у розгалужених вітках, оскільки їхні реактивні складові знаходяться у протифазі.

Для проведення лабораторної роботи з дослідження явища резонансів в електричних колах змінного струму зручно використати панель «Лінійні електричні кола», що входить до стенду «Електротехніка. Основи електроніки УТЛЕ-01» (Кевшин, 2022). Дана панель містить набір котушок індуктивності, конденсаторів та активних опорів різних величин, що дозволяє проводити експерименти при різних значеннях параметрів електричного кола. Можна запропонувати наступну послідовність виконання лабораторної роботи для дослідження режиму резонансу струмів та напруг.

Порядок виконання роботи для дослідження режиму резонансу напруг.

1. Зібрати схему послідовного резонансного контуру, відповідно до рис. 6. Елементи кола вибирати з числа комплектуючих, що входять до стенду «Електротехніка. Основи електроніки УТЛЕ-01». Зовнішній вигляд схеми показано на рис. 7.

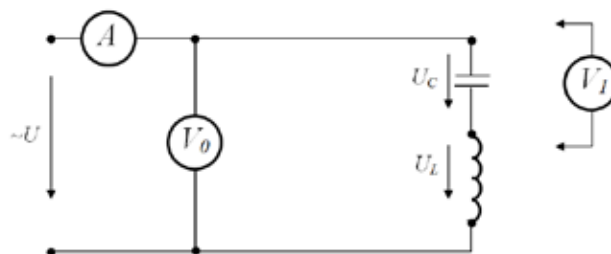


Рис. 6. Схема установки для дослідження резонансу напруг

2. Під'єднайте елементи кола до регульованого джерела синусоїдної напруги JDS6600. Встановіть напругу на виході джерела в межах 5...10 В.

3. Відповідно до вибраних значень L та C теоретично розрахувати резонансну частоту ω_0 .

4. Змінюючи частоту джерела, підберіть режим резонансу напруг по максимальному значенні сили струму у колі. Після цього зніміть ще по п'ять значень для $f=f_{\text{рез}} \pm k\Delta f$, де $k=1-5$, $\Delta f=100$ Гц. Зніміть покази приладів та занесіть відповідні значення у таблицю 1.

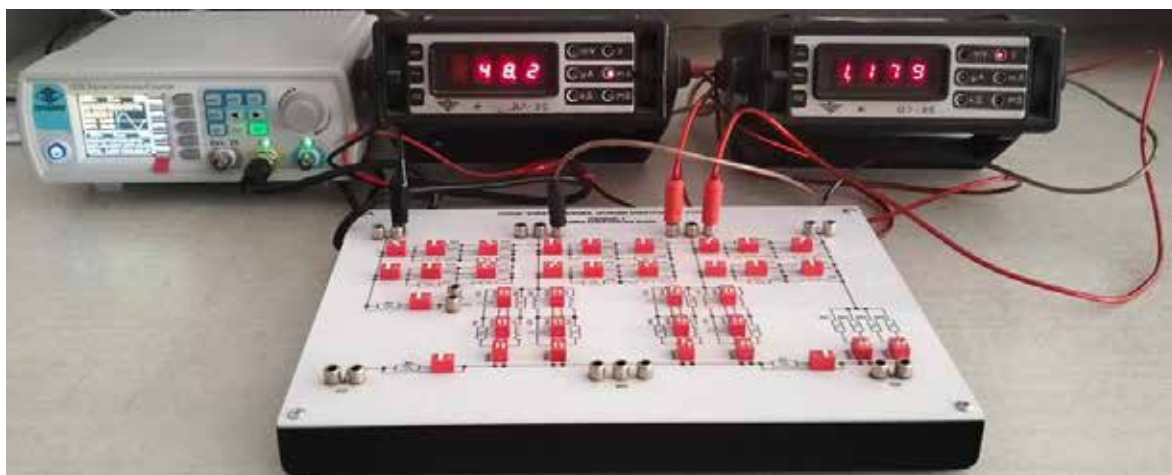


Рис. 7. Зовнішній вигляд установки для дослідження резонансу напруг

Для заповнення стовпців «Обчислено», використайте наступні формули:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad X_L = \omega L = 2\pi fL, \quad X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC},$$

$$Z = \frac{U}{I}, \quad \sin \phi = \frac{X_L - X_C}{Z}, \quad R = Z \cos \phi, \quad S = UI,$$

$$P = S \cos \phi = I^2 R, \quad Q = S \sin \phi$$

5. Порівняйте одержану дослідним шляхом резонансну частоту $f_{\text{рез}}$ з розрахованим теоретичним значенням.

6. За даними таблиці 1 побудуйте графіки залежності $I(f)$, $X_L(f)$, $X_C(f)$, $Z(f)$, $S(f)$, $P(f)$, $Q(f)$.

7. З'єднати послідовно з L та C елементами активний опір R . Зніміть залежність $I(f)$ при постійній напрузі U для двох різних значень R . Побудуйте на одному графіку ці залежності.

Порядок виконання роботи для дослідження режиму резонансу струмів.

1. Зібрати схему послідовного резонансного контуру, відповідно до рис. 8. Елементи кола вибирати з числа комплектуючих, що входять до стенду «Електротехніка. Основи електроніки УТЛЕ-01». Зовнішній вигляд схеми показано на рис. 9.

2. Під'єднайте елементи кола до регульованого джерела синусоїдної напруги JDS6600. Встановіть напругу на виході джерела в межах 5...10 В.

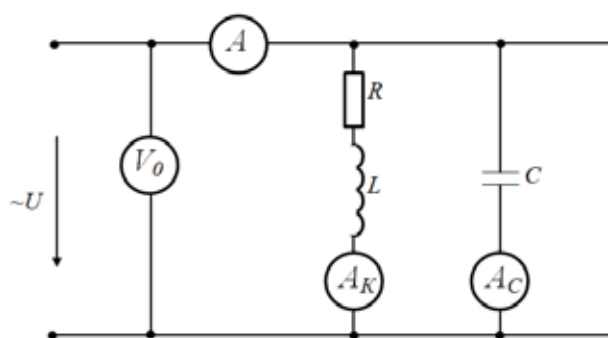


Рис. 8. Схема установки для дослідження резонансу струмів

3. Відповідно до вибраних значень L та C теоретично розрахувати резонансну частоту ω_0 .

4. Змінюючи частоту джерела, підберіть режим резонансу струмів по мінімальному значенні сили струму у колі. Після цього зніміть ще по п'ять значень для $f = f_{\text{рез}} \pm k\Delta f$, де $k=1-5$, $\Delta f=100$ Гц. Зніміть покази приладів та занесіть відповідні значення у таблицю 2.

Для заповнення стовпців «Обчислено», використайте наступні формули: $B_C = \frac{1}{X_C} = \frac{1}{\omega C}$,

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{I}{U}, \quad B_L = \frac{X_L}{R^2 + X_L^2}, \quad B = -B_L + B_C,$$

$$G = \frac{R}{R^2 + X_L^2}, \quad \phi = \arctg \frac{-B_L + B_C}{G}.$$

Таблиця 1

Виміряно					Обчислено						
U , В	f , Гц	I , А	U_K , В	U_C , В	Z , Ом	X_L , Ом	X_C , Ом	j	S , ВА	P , Вт	Q , ВАр



Рис. 9. Зовнішній вигляд установки для дослідження резонансу струмів.

Таблиця 2

Виміряно					Обчислено					
$U, \text{В}$	$f, \text{Гц}$	$I, \text{А}$	$I_K, \text{А}$	$I_C, \text{А}$	$Y, \text{Ом}^{-1}$	$B_L, \text{Ом}^{-1}$	$B_C, \text{Ом}^{-1}$	$B, \text{Ом}^{-1}$	$G, \text{Ом}^{-1}$	j

5. За даними таблиці 2 побудуйте в одній системі координат графіки залежності $I(f)$, $I_C(f)$, $I_K(f)$.

Висновки. У даній статті розглянуті особливості проведення лабораторних занять з курсу «Основи електроніки» при вивченні явища резонансів в електричних колах змінного струму. Такий вид аудиторної роботи здобувачів освіти є важливим етапом практичного освоєння теоретичних основ електроніки. Проведення лабораторних занять має свої

особливості, які забезпечують ефективне засвоєння матеріалу: формування практичних навичок вимірювання параметрів електричних кіл, розвиток умінь аналізувати та інтерпретувати результати експериментів, поглиблення знань про параметри резонансних кіл (добротність, частота резонансу). Результати проведених досліджень можуть знайти застосування під час викладання курсу «Основи електроніки» або інших технічних дисциплін у закладах вищої освіти.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Кевшин А. Г., Галян В. В. Електроніка : конспект лекцій. Луцьк : Вежа-Друк, 2018. 87 с.
2. Кевшин А. Г., Новосад О. В., Федосов С. А. Електротехніка : навч. посіб. Луцьк, 2021. 127 с.
3. Співак В.М., Гуржий А.М., Нельга А.Т., Ітякін О.С. Загальна електротехніка і основи електроніки: навчальний посібник. Київ : КПІ, 2020. 266 с.
4. Кевшин А., Галян В., Третяк А., Артюх Ю., Шафарчук В., Никифоров О., Куршель Д. Використання практичних та лабораторних занять під час вивчення складних лінійних електричних кіл постійного струму в курсі електротехніки. *Фізика та освітні технології*. 2022. № 1. С. 27–33.

REFERENCES:

1. Kevshyn, A. H., & Halian, V. V. (2018). *Elektronika: konspekt leksii* [Electronics: Lecture notes]. Lutsk: Vezha-Druk.
2. Kevshyn, A. H., Novosad, O. V., & Fedosov, S. A. (2021). *Elektrotekhnika: navchalnyi posibnyk* [Electrical engineering: Textbook]. Lutsk.

3. Spivak, V. M., Hurzhii, A. M., Nelha, A. T., & Itiakin, O. S. (2020). *Zahalna elektrotehnika i osnovy elektroniky: navchalnyi posibnyk* [General electrical engineering and basics of electronics: Textbook]. Kyiv: KPI.
4. Kevshyn, A., Halian, V., Tretiak, A., Artiukh, Yu., Shafarchuk, V., Nykyforov, O., & Kurshel, D. (2022). Vykorystannia praktychnykh ta laboratornykh zaniat pid chas vyvchennia skladnykh liniinykh elektrychnykh kil postiinoho strumu v kursi elektrotekhniki [Use of practical and laboratory classes in the study of complex DC linear electrical circuits in the electrical engineering course]. *Fizyka ta osvritni tekhnolohii – Physics and Educational Technologies*, (1), 27–33.

УДК 378.016:53(076.1)

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-6>

Григорій КОБЕЛЬ

кандидат педагогічних наук, доцент кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3774-0032>

Ніна ГОЛОВІНА

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1152-1536>

Валентин САВОШ

доктор педагогічних наук, доцент кафедри теорії та методики викладання шкільних предметів, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9499-885X>

Галина МИРОНЧУК

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9088-3825>

SCOPUS AUTHOR ID: 36245422900

Бібліографічний опис статті: Кобель, Г., Головіна, Н., Савош, В., Мирончук, Г. (2025). Експериментальні задачі в структурі практичних занять університетського курсу фізики. *Фізика та освітні технології*, 1, 47–54, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-6>

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ЗАДАЧІ В СТРУКТУРІ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ УНІВЕРСИТЕТСЬКОГО КУРСУ ФІЗИКИ

Пошук оптимальної моделі проведення практичного заняття з фізики в університетах, є актуальним. Спираючись на багаторічний досвід авторів з викладання фізики в ЗВО, можна стверджувати, що експериментаторські вміння здобувачів освіти потребують вдосконалення. Традиційна побудова освітнього процесу в ЗВО передбачає розвиток умінь та навичок, які необхідні студенту для здійснення експериментальних досліджень, під час виконання лабораторних робіт, де, у більшості випадків, його діяльність є репродуктивною, адже відбувається відповідно до запропонованого йому алгоритму. Успішно реалізувати відповідні програмні результати навчання допоможе використання експериментальних задач у структурі практичних занять. Використання експериментальних задач не заміняє проведення лабораторних робіт і розв'язування обчислювальних задач, а є їх креативним доповненням.

Метою роботи є показати, що впровадження експериментальних задач у структуру практичного заняття дозволяє: перевірити теоретичні твердження експериментально; створити проблемну ситуацію на заняттях, розвивати творче мислення ЗО; показати реальність та обґрунтованість конкретних числових значень фізичних величин, які наведені в умові задачі. Новизною цієї роботи є ідея застосування експериментальних задач при проведенні практичних занять з фізики в університетському курсі.

Зокрема, запропоновано експериментальні задачі з механіки та молекулярної фізики, які успішно можна використовувати при проведенні практичних занять, продемонстровано їх наукові та дидактичні функції. Розкрито зміст практичного заняття з використанням експериментальних задач; наведено приклади експериментальних задач.

Виділено переваги поєднання практичних занять з експериментальними задачами: активне навчання, розвиток практичних навичок, поглиблення розуміння, розвиток дослідницьких навичок, підвищення інтересу до фізики.

Загалом, експериментальні завдання є невід'ємною частиною навчання фізики. Вони поєднують теорію з практикою, роблячи процес навчання ефективнішим.

Ключові слова: експериментальна задача, практичне заняття, механіка, молекулярна фізика, проблемна ситуація.

Hryhoriy KOBEL

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3774-0032>

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, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1152-1536>

Valentyn SAVOSH

Doctor of Pedagogical Sciences, Associate Professor at the Department of Theory and Methods of Teaching School Subjects, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9499-885X>

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: <https://orcid.org/0000-0002-9088-3825>

SCOPUS AUTHOR ID: 36245422900

To cite this article: Kobel, H., Holovina, N., Savosh, V., Myronchuk, H. (2025). Eksperymentalni zadachi v strukturі praktychnykh zaniat universytetskoho kursu fizyky [Experimental problems in the structure of practical classes of the university course of physics]. *Physics and Educational Technology*, 1, 47–54, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-6>

EXPERIMENTAL PROBLEMS IN THE STRUCTURE OF PRACTICAL CLASSES OF THE UNIVERSITY COURSE OF PHYSICS

The search for the optimal model of conducting a practical lesson in physics at universities is relevant. Based on the authors' many years of experience in teaching physics in higher education institutions, it can be argued that the experimental skills of students need to be improved. The traditional structure of the educational process in higher education institutions involves the development of skills and abilities that a student needs to conduct experimental research during laboratory work, where, in most cases, his activity is reproductive, because it occurs in accordance with the algorithm proposed to him. The use of experimental problems in the structure of practical classes will help to successfully implement the relevant program learning outcomes. The use of experimental problems does not replace laboratory work and solving computational problems, but is their creative addition.

The aim of the work is to show that the introduction of experimental problems into the structure of a practical lesson allows: to verify theoretical statements experimentally; to create a problem situation in the lessons, to develop creative thinking of the subject; to show the reality and validity of specific numerical values of physical quantities given in the problem condition. The novelty of this work is the idea of using experimental problems when conducting practical lessons in physics in a university course.

In particular, experimental problems in mechanics and molecular physics are proposed, which can be successfully used when conducting practical lessons, their scientific and didactic functions are demonstrated. The content of a practical lesson using experimental problems is disclosed; examples of experimental problems are given. The advantages of combining practical lessons with experimental problems are highlighted: active learning, development of practical skills, deepening of understanding, development of research skills, increasing interest in physics.

In general, experimental problems are an integral part of teaching physics. They combine theory with practice, making the learning process more effective.

Key words: *experimental problem, practical lesson, mechanics, molecular physics, problem situation.*

Актуальність проблеми. Згідно навчального плану університетський курс загальної фізики реалізовується на лекційних, практичних та лабораторних заняттях. (ННФТІ, 2024).

На лабораторних заняттях студенти здобувають і вдосконалюють експериментальні навички, працюють із фізичним обладнанням. Вони вчаться отримувати експериментально числові значення фізичних величин, перевіряти справедливості фізичних закономірностей. Здобувач освіти (ЗО) може використовувати інструкцію до виконання лабораторної роботи. У ній подано тему, мету, обладнання, завдання, теоретичні відомості, опис приладів, порядок виконання роботи, контрольні запитання. При виконанні лабораторної роботи студент діє згідно запропонованого йому алгоритму, практично не проявляючи при цьому творчості.

На практичних заняттях ЗО закріплюють, отримані на лекціях, знання фізичних законів і вдосконалюють здатність їх практичного застосовування. Розв'язування фізичних задач є основою вивчення курсу загальної фізики. Студенти аналізують явища та процеси, виділяють основні фактори, які їх зумовлюють. Кожна фізична задача має модельне відношення до дійсності, яка набагато складніша, багатогранніша, ніж це подано в її умові. Тому всяку фізичну задачу можна розглядати як модель реального процесу (Головіна, 2021). На цю істину викладач повинен завжди звертати увагу студентів, аналізуючи умову більшості задач з фізики.

Успішно реалізувати відповідні програмні результати навчання (ОПП, 2024) допоможе використання у структурі практичних занять експериментальних задач. Використання експериментальних задач не заміняє проведення лабораторних робіт і розв'язування обчислювальних задач, а є їх креативним доповненням. Після постановки завдання студентам пропонується: розробити теорію експерименту, вивести розрахункову формулу; скласти план вимірювань; здійснити вимірювання; виконати обчислення шуканої величини; обчислити похибки; вказати шляхи підвищення точності експерименту (Кобель, 2014). Використання

експериментальних задач не лише сприяє вдосконаленню експериментаторських навичок, але й розвиває творче мислення, активізує пізнавальну діяльність студентів.

Експериментальні задачі слугують пропедевтикою до виконання лабораторних робіт, або ж розвитку сформованих умінь і навичок в процесі виконання лабораторних робіт (Садовий, 2013).

Таким чином, пошук оптимальної моделі проведення практичного заняття з фізики в університетах, є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Робіт, які б розглядали питання використання експериментальних задач у вищій школі, як виявилось, не так багато. У цьому питанні вигідно виділяється посібник (Дідович, 2012), у якому є параграф про експериментальні задачі, визначення, їх характеристика. «Найближчою за структурою і змістом до наукового дослідження є експериментальна задача. Це задача, для розв'язання якої потрібно спланувати і виконати експериментальне дослідження, а отримані експериментальні результати використати для розв'язання власне задачі. Вона є проміжною, з'єднуючою ланкою між демонстраційним експериментом і розрахунковими задачами, надаючи навчальному процесу з фізики своєрідної специфіки». Виділено якісні та кількісні експериментальні задачі. Відмічається, що розв'язуючи експериментальну задачу, здобувачі освіти не тільки бачать, а й застосовують теоретичні знання на практиці, розуміючи важливість і необхідність фізики. Водночас відмічається, що дидактична роль експериментальних задач не повинна бути перебільшеною, а недоліком є тематична обмеженість їх змісту.

У статті (Кобель, 2014) наведено приклади експериментального визначення сили тертя, коефіцієнтів тертя ковзання та спокою. Відмічено, що експериментальні задачі на дослідження можуть бути використані як роботи фізичного практикуму.

У статті (Подласов, 2023) на прикладах експериментальних задач показана можливість їх застосування при дистанційному навчанні, що дозволяє розвивати експериментаторські

уміння студентів та застосовувати теоретичні знання для розв'язування практичних завдань. Наголошено, що коло експериментальних задач значно розширюється завдяки застосуванню сучасних смартфонів. Виділено переваги застосування смартфона в якості вимірювального пристрою, зокрема, проведення спостережень, що складно проводити безпосередньо; та деякі недоліки, як те, що ЗО покладаються лише на додатки для смартфонів і перестають аналізувати самостійно. У роботі зроблено висновок про те, що експериментальні задачі є перспективним засобом для розвитку дослідницьких умінь здобувачів освіти. Застосування таких задач дозволяє поєднати традиційне розв'язування задач з проведенням експериментального дослідження, коли здобувачі освіти повинні здійснювати майже такі ж самі дії як і при реальному експериментальному науковому дослідженні. Це сприяє формуванню компетентності експериментатора.

У (Мартинюк, 2020) розглянуто питання формування інформаційно-цифрової компетентності завдяки застосуванню сучасних гаджетів.

У статті (Герасимова, 2021) розглядаються особливості організації і проведення практичних занять з фізики із залученням демонстрацій.

Інтеграція знань при формуванні змісту, обсягу та структури лабораторного дослідження продемонстрована в (Оришин, 2012).

Ми ж зупинимося на питаннях поєднання проведення практичного заняття з фізики та використання експериментальних задач.

Мета дослідження. Висвітлення особливостей проведення практичного заняття з використанням експериментальних задач і обґрунтування доцільності їх проведення в сучасних умовах.

Показати, що впровадження експериментальних задач у структуру практичного заняття дозволяє:

- перевірити теоретичні твердження експериментально;
- створити проблемну ситуацію на заняттях, розвивати творче мислення ЗО;
- показати реальність та обґрунтованість конкретних числових значень фізичних величин, які наведені в умові задачі.

У цьому контексті розкриємо зміст практичного заняття з використанням експериментальних задач та покажемо їх місце у підготовці фахівців за вказаним профілем; наведемо приклади експериментальних задач.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження ґрунтується на аналізі програми курсу механіки та молекулярної фізики для бакалаврів фізичних спеціальностей університету та визначенні можливостей застосування експериментальних задач при проведенні практичних занять. Експериментальними називаємо такі задачі, постановка і розв'язання яких вимагають організації та проведення фізичного експерименту. Оскільки час практичного заняття є обмеженим, то необхідне для цього обладнання повинно бути доступним та максимально простим.

На практичному занятті на тему: «Сили тертя. Сухе та рідинне тертя», аналізуючи теоретичний матеріал, звертаємо увагу на те, що «сила тертя ковзання діє вздовж поверхні дотику тіл і трохи менша від максимальної сили тертя спокою» (рис. 1) (Бар'яхтар, 2018).

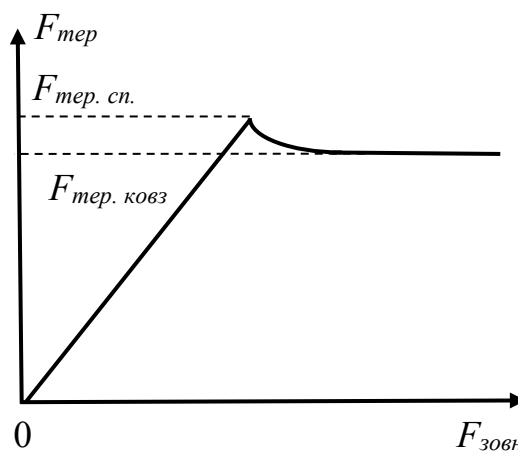


Рис. 1. Залежність сили тертя від прикладеної зовнішньої сили

Перевірити це теоретичне твердження можемо на експерименті.

Завдання 1. Визначити відношення коефіцієнта тертя спокою до коефіцієнта тертя ковзання дерева по дереву.

Обладнання: дві короткі дерев'яні палички (довжиною 10 см), дерев'яна паличка довжиною 38 см, міліметрова лінійка.

Розв'язування: Визначимо положення центра мас довшої палички. Покладемо її на дві

короткі палички, які лежать на горизонтальній поверхні стола. Наближуємо одну коротку паличку (наприклад 2) від кінця до середини верхньої палички, а паличку 1 утримуємо нерухомо. Спостерігаємо, що відбувається при цьому. Спочатку довша паличка ковзає відносно палички 2, а відносно першої нерухома. Потім вона починає ковзати відносно першої палички, а відносно другої не рухається. Розглянемо проекцію сил на горизонтальну вісь, які діють на довшу паличку у момент зміни руху (рис. 2). Сила тертя спокою $\vec{F}_{mp1}$ з боку палички 1 рівна за модулем силі тертя ковзання $\vec{F}_{mp2}$ з боку палички 2. Тобто $F_{mp1} = F_{mp2}$. Виразимо сили тертя через відповідні коефіцієнти тертя. $F_{mp1} = \mu_{cn} N_1$; $F_{mp2} = \mu_k N_2$. Тоді $\mu_{cn} N_1 = \mu_k N_2$. Запишемо умову рівноваги (правило моментів) відносно центра мас верхньої палички: $N_1 a = N_2 b$. З двох останніх рівнянь знаходимо: $\frac{\mu_{cn}}{\mu_k} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{a}{b}$. Вимірюємо лінійкою відстані a та b (рис. 2). Обчислюємо відношення коефіцієнта тертя спокою до коефіцієнта тертя ковзання та пересвідчуємося у тому, що коефіцієнт тертя спокою є більшим.

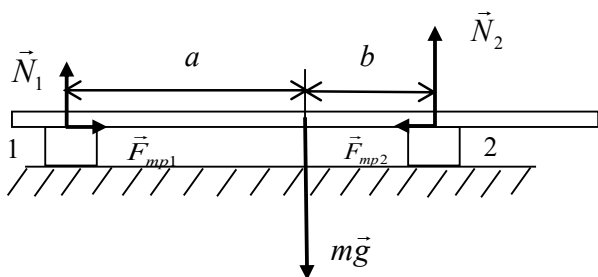


Рис. 2. Сили, які діють на довгу паличку у момент зміни руху

На практичному занятті на тему: «Власні гармонічні коливання механічних систем (пружинний, математичний та фізичний маятники)» можемо запропонувати розв'язати таку експериментальну задачу.

Завдання 2. Визначити період коливань тіла на пружній гумовій нитці

Обладнання: гумова нитка, нитка, лінійка, тягарець (тіло) невідомої маси

Розв'язування: Звичайно для визначення періоду коливань вимірюють час певної кількості коливань. В обладнанні немає секундоміра, тому прямим вимірюванням часу ми не можемо скористатися. Виникла *проблемна*

ситуація. Період коливань пружинного маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, k – жорсткість гумової нитки, m – маса тягарця. Для визначення маси тягарця потрібні терези, але і їх ми не маємо. А може не шукати окремо m та k , а варто визначити відношення $\frac{m}{k}$? Підвісимо тягарець на гумовій нитці (рис. 3), нитка при цьому видовжиться на $\Delta\ell = \ell - \ell_0$, де ℓ_0 – довжина недеформованої гумової нитки. Умова рівноваги системи: $mg = k\Delta\ell$. Звідси маємо шукане $\frac{m}{k} = \frac{\Delta\ell}{g}$. Тоді період коливань: $T = 2\pi\sqrt{\frac{\Delta\ell}{g}}$. Отже, для розв'язання задачі потрібно всього лиш виміряти видовження гумової нитки під дією ваги тягарця у стані спокою.

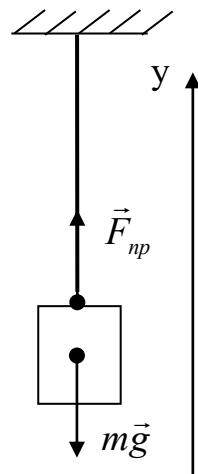


Рис. 3. Сили, які діють на тягарець

Похибка вимірювання буде меншою, якщо вимірювати відразу видовження гумової нитки $\Delta\ell = \ell - \ell_0$, а не окремо довжини ℓ та ℓ_0 . Для цього потрібно відмітити положення нижнього кінця гумової нитки відносно нерухомого предмета (вертикальної стійки штатива чи закріпленої вертикально лінійки). Проте відмітити точно положення нижнього кінця недеформованої нитки складно. Варто використати додатковий вантаж: наприклад, ручку. Відмічаємо положення нижнього краю гумової нитки два рази: з підвішеною ручкою і ручкою та тягарцем. Тоді $mg = k(\ell_2 - \ell_1)$.

Розв'язування цієї експериментальної задачі дозволяє не лише закріпити отримані знання, але й розвивати творче мислення, проводити дослідження, відшукати шляхи підвищення точності експерименту.

При розв'язуванні обчислювальних задач всі необхідні для цього числові значення фізичних величин задані в умові задачі або деякі з них ЗО знаходять у довідкових матеріалах. Наприклад, у задачі 3.98. (Дідович, 2012) задані: об'єм кімнати, температура повітря, відносна вологість, густина насиченої пари. Ми ж пропонуємо на практичному занятті з молекулярної фізики розглянути подібну, але експериментальну задачу, в якій невідомі величини потрібно виміряти або знайти у таблицях.

Завдання 3. Визначити кількість молекул води, які перебувають в повітрі аудиторії.

Обладнання: спиртовий термометр, посудина з водою, шматок вати або бинта, нитка, довідник з фізики, лазерний вимірник відстані.

Розв'язування. Вимірюємо температуру t в аудиторії з допомогою термометра. Обгортаємо резервуар термометра ватою і змочуємо вату водою. Після того як покази термометра перестануть змінюватися записуємо покази зволоженого термометра. За показами сухого термометра і різницею показів сухого і зволоженого термометрів визначаємо відносну вологість повітря в кімнаті за допомогою психрометричної таблиці. Наведемо приклад вимірювань температури та визначення відносної вологості. $t = 21^\circ\text{C}$, $t_s = 18^\circ\text{C}$. Тоді $\phi = 75\%$. Відносну вологість ми не обчислюємо, а визначаємо за психрометричною таблицею для відповідних значень показів сухого термометра і різниці показів сухого і зволоженого термометрів. Відносна вологість повітря $\phi = \frac{p}{p_n} 100\%$, де p – парціальний тиск водяної пари у повітрі, p_n – парціальний тиск насиченої водяної пари у повітрі, який знаходимо за таблицею залежності тиску насиченої водяної пари від температури. Тоді $p = \frac{\phi p_n}{100\%}$. Згідно з основним рівнянням МКТ $p = nkT$, n – концентрація молекул води, k – стала Больцмана, T – абсолютна температура вологого повітря: $T = t + 273$. Концентрація молекул $n = \frac{N}{V}$, де N – загальна кількість молекул, $V = abc$ – об'єм кімнати. Тоді $\frac{\phi p_n}{100\%} = \frac{N}{V} kT$. Звідки знаходимо $N = \frac{\phi p_n V}{kT \cdot 100\%} = \frac{\phi p_n abc}{kT \cdot 100\%}$. Знаходимо за таблицею залежності тиску насиченої водяної пари від температури для $t = 21^\circ\text{C}$: $p_n = 2486 \text{ Па}$. Із таблиць знаходимо сталу

Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$. Розміри кімнати $a = 5,45 \text{ м}$, $b = 11,76 \text{ м}$, $c = 2,78 \text{ м}$ вимірюємо лазерним далекоміром. $T = 21 + 273 = 294 \text{ К}$.

$$N = \frac{75 \cdot 2486 \cdot 5,45 \cdot 11,76 \cdot 2,78}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 294 \cdot 100\%} = 8,188 \cdot 10^{25}$$

Більш практичною буде інформація про масу молекул водяної пари: $m = m_0 N = \frac{M}{N_A} N$,

$$m = \frac{18 \cdot 10^{-3} \cdot 8,188 \cdot 10^{25}}{6,022 \cdot 10^{23}} = 2,45 (\text{кг})$$
.

Використання такої експериментальної задачі замість текстової, обчислювальної сприятиме формуванню в ЗО не лише предметної компетентності (ПК5) «Здатність розв'язувати задачі з фізики та навчати учнів їх розв'язуванню», а й ПК4 «Здатність здійснювати усі види фізичного експерименту, у тому числі і навчального, відповідно до методики і техніки проведення» (ОПП, 2024).

Якщо при проведенні лабораторної роботи здобувачі освіти використовують подані викладачем теоретичні відомості та хід проведення експерименту, то у нашому випадку, самостійна постановка експерименту (планування та проведення) при розв'язуванні задачі буде для них не легким завданням.

Це завдання дозволяє студентам не тільки закріпити знання з молекулярної фізики, але й проявити свою творчість та дослідницькі здібності; сприяє розвитку навичок планування експерименту, аналізу отриманих результатів. Важливо зауважити, яка велика кількість молекул водяної пари літає в аудиторії і це становить майже два з половиною кілограми!

Виконання запропонованих експериментальних задач потребує простого обладнання. Такі завдання студенти можуть також розв'язувати вдома самостійно.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Висвітлено особливості проведення практичного заняття з використанням експериментальних задач і обґрунтовано доцільність їх проведення в сучасних умовах. Розкрито зміст практичного заняття з використанням експериментальних задач; наведено приклади експериментальних задач.

Виділено переваги поєднання практичних занять з експериментальними задачами:

- *Активне навчання* – здобувачі освіти активно залучаються до процесу навчання, що сприяє кращому засвоєнню матеріалу.

- *Розвиток практичних навичок* – здобувачі освіти набувають практичних навичок роботи з вимірювальними приладами та обладнанням.
- *Поглиблення розуміння теорії* – експериментальна робота допомагає краще зрозуміти та засвоїти теоретичні концепції.
- *Розвиток дослідницьких навичок* – виконання експериментів вимагає від студентів застосування логічного мислення, аналізу даних та формулювання гіпотез. Це сприяє розвитку критичного мислення та здатності до самостійного дослідження.
- *Підвищення інтересу до фізики* – експериментальна робота робить навчання більш

цікавим та захопливим, стимулюючи інтерес до фізики та науки в цілому.

Отже, поєднання експериментальних завдань з проведенням практичного заняття є ефективним методом навчання фізики, що сприяє розвитку всебічно розвиненої особистості, здатної до аналізу, дослідження та практичного застосування знань.

Загалом, експериментальні завдання є невід’ємною частиною навчання фізики. Вони поєднують теорію з практикою, роблячи навчання більш ефективним та цікавим.

Вважаємо, що пошук експериментальних задач, які можна використовувати при проведенні практичних занять з різних розділів фізики є перспективним.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Середня освіта. Фізика. Навчальний план. Луцьк, 2024. URL: https://vnu-taskid841251.s3.eu-north-1.amazonaws.com/s3fs-public/Educational%20programs/Document%20programs/navchalnyy-plan-014.08so_bak_2024.pdf (дата звернення: 10.02.2024).
2. Головіна Н., Кобель Г. Задачі-моделі й моделі до задач. *Фізика та освітні технології*, 2021. № 2. С. 16–22.
3. Середня освіта. Фізика. Освітньо-професійна програма. Луцьк, 2024. URL: https://vnu-taskid841251.s3.eu-north-1.amazonaws.com/s3fs-public/Educational%20programs/Document%20programs/opp_2024-3.pdf (дата звернення: 10.02.2024).
4. Кобель Г. П., Гоцик І. А. Експериментальне вивчення тертя. *Науковий часопис НПУ імені М. П. Драгоманова* Педагогічні науки: реалії та перспективи Серія 5. В.48, 2014. С. 69–72.
5. Садовий М.І., Вовкотруб В.П., Трифонова О.М. Вибрані питання загальної методики навчання фізики: навчальний посібник [для студ. ф.-м. фак. вищ. пед. навч. закл.]. Кіровоград: ПП «Центр оперативної поліграфії «Авангард», 2013. 252 с.
6. Дідович М.М., Савченко В.Ф., Мельничук О.В. Методика навчання розв’язувати задачі з фізики: Навч. посібник. Ніжин: Видавництво НДУ ім. М. Гоголя, 2012. 472 с.
7. Подласов С., Свердліченко Д., Матвійчук О. Експериментальні задачі з фізики в технічному університеті. *Фізико-математична освіта*. 2023. Т. 38, № 3. С. 50–56.
8. Martyniuk O. O., Martyniuk O. S., Muzyka I. O. Formation of informational and digital competence of secondary school students in laboratory work in physics. *CTE 2020: 8th Workshop on Cloud Technologies in Education*, December 18, 2020, p. 366–383. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2879/paper20.pdf>
9. Герасимова К.В., Ткаченко Г.І. Практичні заняття з фізики із залученням демонстрацій у закладах вищої освіти. *Фізико-математична освіта*. 2021. Випуск 4(30). С. 29–33.
10. Фізика (рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтєва В. М.) підруч. для 10 кл. закл. загал. серед. освіти / Бар’яхтар В. Г. та ін.; за ред. Бар’яхтара В. Г., Довгого С. О. Харків: Вид-во «Ранок», 2018. 272 с.
11. Орищин Ю. М, Савош В. О. Балістичний маятник у лабораторному практикумі як приклад інтеграції знань з фізики. *Вісник Чернігівського державного педагогічного університету*. 2012. Вип. 99. Серія : Педагогічні науки. С. 258–263.

REFERENCES:

1. Srednia osvita. Fyzyka. Navchalnyi plan. Lutsk, 2024. [Secondary education. Physics. Curriculum. Lutsk, 2024]. Retrieved from: https://vnu-taskid841251.s3.eu-north-1.amazonaws.com/s3fs-public/Educational%20programs/Document%20programs/navchalnyy-plan-014.08so_bak_2024.pdf (data zvernennia: 10.02.2024).) [access date: 10.02.2024]. [in Ukrainian].
2. Holovina, N., & Kobel, H. (2021). Zadachi-modeli y modeli do zadach. [Model problems and models for problems]. *Fyzyka ta osvityni tekhnolohii – Physics and educational technologies*, 2, 16–22 [in Ukrainian].
3. Srednia osvita. Fyzyka. Osvitno-profesiina prohrama. Lutsk, 2024. [Secondary education. Physics. Educational and professional program. Lutsk, 2024]. Retrieved from: https://vnu-taskid841251.s3.eu-north-1.amazonaws.com/s3fs-public/Educational%20programs/Document%20programs/opp_2024-3.pdf (access date: 10.02.2024). [in Ukrainian].

4. Kobel, H. P., & Hotsyk, I. A. (2014). Eksperymentalne vyvchennia tertia. 5. [Experimental study of friction. *Scientific journal of the NPU named after M. P. Dragomanov Pedagogical sciences: realities and prospects Series 5. – Naukovyi chasopys NPU imeni M. P. Drahomanova Pedagogichni nauky: realii ta perspektyvy Serii*, 48, 69–72 [in Ukrainian].
5. Sadovyi, M.I., Vovkotrub, V.P., & Tryfonova, O.M. (2013). Vybrani pytannia zahalnoi metodyky navchannia fizyky: navchalnyi posibnyk [Selected issues of general methodology of teaching physics: a textboo]: for students of physics and mathematics faculty of higher pedagogical universities. Kirovograd: PP «Center for Operational Printing «Avangard», 252 p. [in Ukrainian].
6. Didovych, M.M., Savchenko, V.F., & Melnychuk, O.V. (2012). Metodyka navchannia rozviazuvaty zadachi z fizyky [Methods of teaching solving problems in physics]: Textbook. Nizhyn: Publishing House of the NDU named after M. Gogol, 472 p. [in Ukrainian].
7. Podlasov, S., Sverdlichenko, D., & Matviichuk, O. (2023). Eksperymentalni zadachi z fizyky v tekhnichnomu universyteti. [Experimental problems in physics at a technical university. *Fizyko-matematychna osvita – Physics and mathematics education*, 38, 3, 50–56 [in Ukrainian].
8. Martyniuk, O. O., Martyniuk, O. S., & Muzyka, I. O. (2020). Formation of informational and digital competence of secondary school students in laboratory work in physics. CTE 2020: 8th Workshop on Cloud Technologies in Education, December 18, p. 366–383. Retrieved from: <http://ceur-ws.org/Vol-2879/paper20.pdf>.
9. Herasymova, K.V., & Tkachenko, H.I. (2021). Praktychni zaniattia z fizyky iz zaluchenniam demonstratsii u zakladykh vyshchoi osvity. [Practical lessons in physics with demonstrations in higher education institutions. *Fizyko-matematychna osvita – Physics and mathematics education*, 4(30), 29–33.] [in Ukrainian].
10. Bariakhtar, V. H., Loktiev, V. M. (Ed.), Dovhyi, S. O. (Ed.), et al. (2018). Fizyka (riven standartu, za navchalnoi prohramoiu avtorskoho kolektyvu pid kerivnytstvom Loktieva V. M.): Pidruchnyk dlia 10 kl. zakl. zahal. sered. osvity [Physics (standard level, according to the curriculum of the author team under the supervision of V. M. Loktiev): Textbook for grade 10 of general secondary education institutions]. Kharkiv: Vyd-vo «Ranok».
11. Oryshchyn, Yu. M., & Savosh, V. O. (2012). Balistychnyi maiatnyk u laboratornomu praktykumi yak pryklad intehtatsii znan z fizyky [The ballistic pendulum in laboratory practice as an example of integrating knowledge of physics]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu – Bulletin of the Chernihiv State Pedagogical University*, (99), Serii: Pedahohichni nauky, 258–263.

УДК 37.091.313-044.247:[004:5:621.396.6]

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-7>

Олександр МАРТИНЮК

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4473-7883>

Scopus Author ID: 57224619200

Бібліографічний опис статті: Мартинюк, О. (2021). Мікроконтролерна схемотехніка та засоби тривимірного моделювання в системі stem-навчання робототехніки. *Фізика та освітні технології*, 1, 55–61, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-7>

МІКРОКОНТРОЛЕРНА СХЕМОТЕХНІКА ТА ЗАСОБИ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В СИСТЕМІ STEM-НАВЧАННЯ РОБОТОТЕХНІКИ

Концепція STEM-навчання базується на практичному застосуванні знань і вмінь для подальшого їх використання у професійній діяльності. Проектний підхід дозволяє здобувачам освіти зрозуміти як STEM-знання застосовуються в реальному житті. У роботі проаналізовано розроблену та апробовану концепцію поєднання можливостей засобів освітньої робототехніки, тривимірного прототипування та програмування мікроконтролерних платформ. 3D-прототипування в робототехніці ефективно тому, що користувач має змогу швидко отримувати результати та впроваджувати свої ідеї у процесі проектування конструкцій. Робототехнічний STEM-проект, виконаний у процесі навчання, може бути не тільки об'єктом вивчення, а й засобом для моделювання, конструювання, інструментом у навчальному експерименті, цифровою лабораторією, інструментом для програмування мікроконтролерів. Як приклад, наведено технологічні аспекти виготовлення та програмування SMARS-платформ. SMARS (Screwless Modular Assemblable Robotic System) – беззвинтова модульна збірна роботизована система, популярний нині технологічний освітній засіб. Це прості платформи, розроблені для навчальних цілей з мінімальною кількістю компонентів, які можна збирати без спеціальних додаткових засобів. Описано послідовність виконання проектів та специфіку програмування їх електронних частин – мікроконтролерних платформ Arduino. Проаналізовано основні функції, які може виконувати SMARS та додаткові елементи конструкції, що розширюють можливості їх використання. Робота над проектуванням та виготовленням конструкцій відкриває низку можливостей для вивчення питань технологічного характеру та активізації пізнавальної діяльності здобувачів освіти. У процесі проектної роботи розвиваються конструкторські й творчі здібності, формуються основи фахової та цифрової компетентності.

Ключові слова: мікроконтролерна схемотехніка, робототехніка, STEM-орієнтоване навчання, проектні технології.

Oleksandr MARTYNIUK

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4473-7883>

SCOPUS AUTHOR ID: 57224619200

To cite this article: Martyniuk, O. (2021). Mikrokontrolerna skhemotekhnika ta zasoby tryvymirnoho modeliuvannia v systemi stem-navchannia robototekhniky [Microcontroller circuit technique and three-dimensional modeling tools in the stem-training system of robotics]. *Physics and Educational Technology*, 1, 55–61, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-7>

MICROCONTROLLER CIRCUIT TECHNIQUE AND THREE-DIMENSIONAL MODELING TOOLS IN THE STEM-TRAINING SYSTEM OF ROBOTICS

The concept of STEM education is based on the practical application of knowledge and skills for their further use in professional activities. The project approach allows students to understand how STEM knowledge is applied in real life. The paper analyzes the developed and tested concept of combining the capabilities of educational robotics tools, three-

dimensional prototyping and programming microcontroller platforms. 3D prototyping in robotics is effective because the user can quickly obtain results and implement their ideas in the design process. A robotic STEM project completed in the learning process can be not only an object of study, but also a tool for modeling, design, a tool in an educational experiment, a digital laboratory, a tool for programming microcontrollers. As an example, the technological aspects of manufacturing and programming SMARS platforms are given. SMARS (Screwless Modular Assemblable Robotic System) is a screwless modular assembled robotic system, a currently popular technological educational tool. These are simple robotic platforms designed for educational purposes with a minimum number of components that can be assembled without special additional tools. The sequence of project implementation and the specifics of programming their electronic parts – Arduino microcontroller platforms – are described. The main functions that SMARS can perform and additional design elements that expand the possibilities of its use are analyzed. Work on the design and manufacture of structures opens up wide opportunities for studying issues of a technological nature and activating the cognitive activity of students. In the process of project work, design and creative abilities are developed, and the foundations of professional and digital competence are formed.

Key words: microcontroller circuit engineering, robotics, STEM-oriented learning, design technologies.

Вступ. Сучасні вимоги щодо підготовки фахівців спонукають до підвищення модернізації природничо-математичного та технологічного складників освітнього середовища на основі впровадження новітніх інструментів. Одним із них є система STEM-орієнтованого навчання, що базується на практичному застосуванні знань і вмінь для подальшого їх використання у професійній діяльності. STEM-освіта забезпечує «... становлення фахівців різних науково-технічних, інженерних професій на базі закладів вищої освіти, а також підвищення професійної майстерності педагогічних працівників із впровадження нових методик викладання, відповідних курсів та реалізації інноваційних проєктів» (ІМЗО, 2024). Організація STEM-навчання здійснюється згідно з планом заходів щодо реалізації Концепції розвитку природничо-математичної освіти (STEM-освіти) до 2027 року (КМУ, 2023). У «Методичних рекомендаціях щодо розвитку STEM-освіти в закладах загальної середньої та позашкільної освіти у 2023/2024 навчальному році» зазначено про необхідність «... застосовувати проєктно-орієнтоване навчання (розроблення навчального проєкту, орієнтуючись на власний досвід та досвід інших); інженерне проєктування (моделювання продуктів); навчання винахідництву (пошук творчих рішень); проблемне навчання (навчання з фокусом на реальні життєві ситуації, що дозволяє здобувачам освіти зрозуміти як STEM-знання застосовуються в реальному житті). ... Варто надавати можливість здобувачам освіти брати участь у STEM-проєктах, співпрацюючи з підприємствами, науковими установами та громадськими організаціями. Це сприятиме формуванню інтересу до STEM-кар'єри» (ІМЗО, 2024).

Для досягнення висунутих завдань нами використано розроблену та апробовану

концепцію поєднання можливостей засобів освітньої робототехніки, тривимірного моделювання (прототипування) та програмування мікроконтролерних платформ. Освітня робототехніка є дидактичною моделлю робототехніки як технологічної галузі. Елементи цієї моделі можуть бути використані для організації вивчення сучасних цифрових технологій з метою популяризації інженерно-технічних та природничо-математичних спеціальностей. Робототехнічний STEM-проєкт, виконаний у процесі навчання, може бути не тільки об'єктом вивчення, а й засобом для моделювання та конструювання, інструментом у навчальному експерименті, цифровою лабораторією, тощо. Проте, при налаштуванні вузлів і механізмів необхідно розуміти фізичні закономірності їх функціонування, враховувати похибки, знати розмірності, тощо (Мартинюк, 2024). Основними технологічними засобами, що забезпечують функціонування роботизованого комплексу є мікроконтролерна платформа, або модуль на основі мікроконтролера. Тому програмування мікроконтролерів, знання мов програмування та вміння виконувати конструктивно-технічну роботу є необхідними умовами виконання робототехнічного проєкту. Сама ж платформа моделюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення та виготовляється за допомогою 3D-принтера. Поєднання можливостей тривимірного прототипування та програмування мікроконтролерів є особливо значимими у проєктуванні засобів освітньої робототехніки (Мартинюк, 2019).

Проєктно-орієнтоване навчання на основі концепції STEM у закладах середньої та вищої освіти забезпечує можливість здобувачам освіти адаптуватись до вимог ринку праці. Це підвищить не тільки конкурентоспроможність

випускників, а й вимоги до рівня навчання для викладачів, коригуванню програм, модернізації та оновлення матеріально-технологічного забезпечення. Аналізуючи стан такого підходу у вітчизняному та зарубіжному освітньому просторі робимо висновок про надзвичайну його актуальність та необхідність впровадження й розвитку. Економіка, бізнес, наука та інші галузі мають велику потребу у кваліфікованих фахівцях, а знання STEM-технологій та практичний досвід їх використання формують для майбутніх фахівців перспективу в роботі та професійній кар'єрі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз праць психолого-педагогічної тематики підтверджують, що залучення здобувачів освіти до розроблення STEM-проектів сприяє розвитку особистості у всіх соціальних сферах (Завалевський, 2021, с. 50-60). Теоретичний аналіз педагогічної літератури засвідчує інтерес науковців до різних аспектів STEM-освіти. Питання освітньої робототехніки та програмування роботизованих платформ досліджується у роботах багатьох зарубіжних дослідників (David, 2012; Eguchi, 2012).

Ефективним інструментом цифрового технологічного забезпечення є поєднання можливостей засобів освітньої робототехніки та тривимірного прототипування. Особливістю використання 3D-прототипування в робототехніці є те, що користувач має змогу швидко отримувати результати та впроваджувати свої ідеї у процесі проектування робототехнічної конструкції. Електронним складником роботизованої системи зазвичай є мікроконтролерна платформа Arduino (About Arduino, 2018), для якої можна створювати програми та керувати електронними пристроями. Для цього необхідно опанувати мову програмування C++. Технології програмування платформи Arduino та особливості впровадження STEM-проектів на базі мікроконтролерів проаналізовано у роботах (Остапчук, 2018; Садовий, 2021). Роботи Беглової (2024), Кошового (2024) присвячено проблемам вивчення програмування платформ Arduino.

Метою статті є аналіз можливостей та приклад використання мікроконтролерних платформ і тривимірного прототипування для проектування роботизованих систем в концепції STEM-орієнтованого навчання здобувачів

освіти спеціальностей фізика, інформатика та технології.

Виклад основного матеріалу дослідження. Робототехніка та конструювання є одним із напрямків STEM-орієнтованого навчання. Нині на ринку існує багато різноманітних засобів (конструкторів, наборів, навчальних комплектів тощо) для вивчення основ проектування роботизованих платформ різного рівня складності. Переважно це конструктори, наприклад Lego, наборів типу WeDo, Makeblock, MAX R/C-TETRIX, тощо. У своєму складі такі набори містять усі необхідні компоненти для самостійного проектування та програмування, вирізняються переважно якісною елементною базою з можливістю різних видів з'єднань пластмасових чи металевих деталей. Окрім цього, такі набори містять базовий модуль або мікроконтролерну платформу з якісним програмним забезпеченням для навчання основам програмування. Для розширення функціоналу виготовлених моделей конструктори комплектуються різноманітними датчиками: світла, температури, ультразвуковими датчиками, гіроскопом, акселерометром та багатьма іншими. Для програмування використовують відомі та популярні платформи Arduino, Micro:bit та інші. Такі конструктори адаптовані для різних вікових категорій користувачів – від дітей молодшого шкільного віку до здобувачів освіти вищів. Проте, маючи усе необхідне для роботи користувачі позбавлені можливості проаналізувати усі технологічні аспекти створення комплектуючих майбутньої моделі та вивчення інструментів для її виготовлення. Тому концепція поєднання тривимірного прототипування та програмування мікроконтролерних платформ у процесі проектування робіт різних конструкцій є значно ефективнішою. І не обов'язково затрачати час на самостійне моделювання складових майбутньої конструкції – це можна виконувати, наприклад, у процесі навчання за програмою вибіркового освітніх компонентів, наприклад, «3D-графіка та прототипування», «Тривимірне моделювання та друк», передбачені програмами навчання у Навчально-науковому фізико-технологічному інституті Волинського національного університету імені Лесі Українки (Каталог ОП, 2024). У вільному доступі нині існує багато інформаційних ресурсів, які містять інструктивні матеріали та безкоштовні для завантаження файли

цікавих технічних рішень, які з дозволу авторів з успіхом можна використовувати в освітньому процесі.

Як приклад, розглянемо конструкцію SMARS платформи, яку здобувачі освіти виготовляють та програмують на практичних заняттях (Рис. 1). SMARS (Screwless Modular Assemblable Robotic System – безгвинтова модульна збірна роботизована система) (What is SMARS?, 2020) – проста роботизована платформа, розроблена для навчальних цілей з мінімальною кількістю компонентів, які можна збирати без гвинтів і пайки чи клею.

Усі необхідні для друку файли можна безкоштовно завантажити із сторінки розробника (SMARS modular robot, 2017). Тут є детальна інформація щодо її монтажу та файли для програмування мікроконтролерної платформи Arduino UNO. Складниками комплекту окрім Arduino UNO ще є два двигуни Mini 150RPM Motors, Adafruit Motor Shield V.1 or V.2 та акумуляторне джерело живлення. Для розширення апаратних функцій, зокрема забезпечення можливості огинання перешкод, передбачено монтаж та програмування ультразвукового датчика відстані HC-SR04.

Перш ніж виконувати монтажні роботи, здобувачі освіти готують .stl-файли до виведення на друк спеціальною програмою для виконання слайсингу та за допомогою 3D принтерів (у нас їх чотири), виготовляють усі необхідні пластмасові компоненти. Кожна група студентів виконує своє завдання, після чого приступають до виконання монтажу конструкції. Така групова

робота забезпечує реалізацію діяльнісного підходу, тобто спрямованість освітнього процесу на розвиток ключових компетентностей і наскрізних умінь, застосування теоретичних знань на практиці, формування здібностей до самоосвіти та командної роботи. Після виготовлення конструкції перевіряють її найпростіші функції, запрограмувавши платформу Arduino UNO. Нагадаємо, що Arduino – апаратно-програмна платформа на базі мікроконтролерів сімейства Atmel AVR та елементів обв'язки для програмування та інтеграції з іншими схемами. Мова програмування Arduino запозичена з середовища програмування „Processing”. Arduino, як і інші аналогічні засоби (Raspberry, Parallax Basic Stamp, Netmedia's BX-24, Phidgets, MIT's Handyboard тощо) надає можливості користувачу простого і швидкого програмування. У мікроконтролер попередньо прошитий завантажувач, тому немає необхідності у зовнішньому програматорі.

Середовище розробки Arduino має вбудований текстовий редактор програмного коду, компілятор і підключається до апаратної частини Arduino. Програма, написана в середовищі Arduino, називається скетч. Спершу студенти/студентки редагують та завантажують просту програму керування, згідно алгоритму якої платформа рухається вперед, а потім назад. Потім алгоритм ускладнюють поворотами вправо-вліво. Після досягнення бажаного результату, приєднують до конструкції ультразвуковий датчик відстані HC-SR04 і формують програму для огинання платформою перешкод.

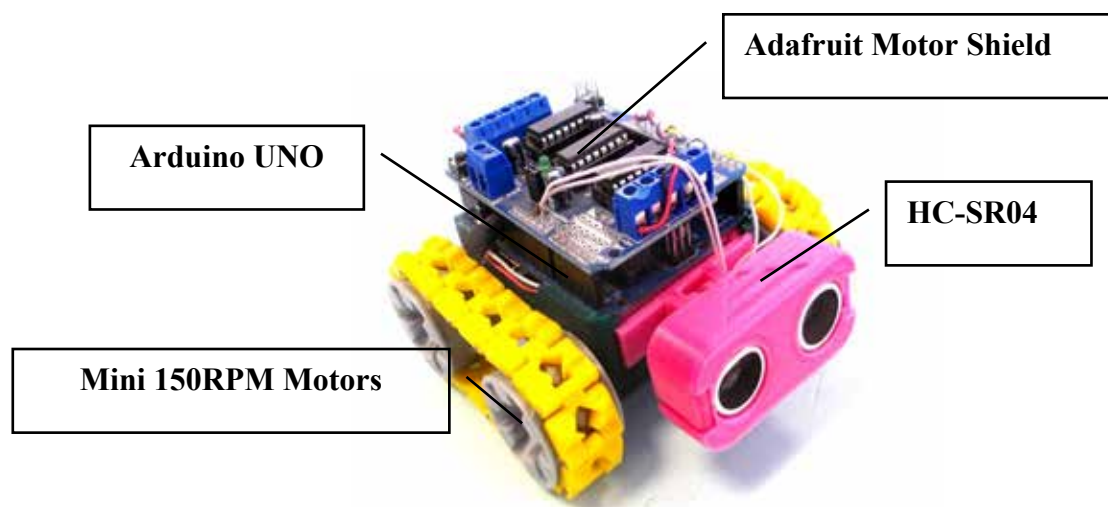


Рис. 1. Конструкція виготовленого SMARS-робота

Доповненням конструкції є універсальний датчик кольору на ISL29125, з яким можна додати функцію розпізнавання кольору і сформувати програму, завантаживши яку забезпечити рух платформи по нанесеній на горизонтальну поверхню лінії. До речі, за таким принципом працюють роботи-офіціанти у закладах громадського харчування, які привозять замовлення до місця призначення, рухаючись по нанесеній на підлозі лінії-маршрутизатору.

І ще одним завданням є кріплення до платформи тримача для олівця (фломастера). Така конструкція забезпечує можливість залишати слід лінії на горизонтальній поверхні, по якій рухається платформа і створити модель своєрідного плоттера. Для цього необхідно написати програму, згідно алгоритму якої платформа рухатиметься за даними координатами і описуватиме траєкторію, яку рисуватиме олівець (фломастер) на горизонтальній поверхні, наприклад паперовому ватмані.

На відміну від запропонованого прототипу (SMARS modular robot, 2017), здобувачами освіти, які виконували проєкт, виготовлено джерело живлення на основі мініатюрної акумуляторної батареї та зарядного модуля. Це забезпечує можливість довготривалого використання

платформи з подальшим підзарядженням батареї без необхідності її заміни, як у оригінальній конструкції.

Конструкцію крокуючого робота-павука (рис. 2) виготовлено здобувачами освіти на практичних заняттях курсу «STERM-технології». Як і описаний вище SMARS-проєкт, основні складники цієї конструкції виготовлено з використанням тривимірного друку. Необхідні для друку файли можна безкоштовно завантажити із сторінки розробника (<https://www.thingiverse.com/thing:2662828>). Учасники проєктної групи, вивчивши згідно програми курсу, готують файли до виведення на друк (виконують слайсинг та налаштування принтерів) та друкують усі необхідні деталі конструкції. Електронними складниками крокуючого робота є мікроконтролерна платформа Arduino Pro mini, сервомотори та шилд сервомоторів, ультразвуковий датчик відстані HC-SR04, з'єднувальні провідники, акумуляторна батарея, модуль заряджання.

Для програмування мікроконтролерної платформи Arduino Pro mini використовуємо програматор. Алгоритм програми передбачає програмування платформи рухатись у заданому напрямку та огинати перешкоди, які фіксує ультразвуковий датчик відстані HC-SR04.

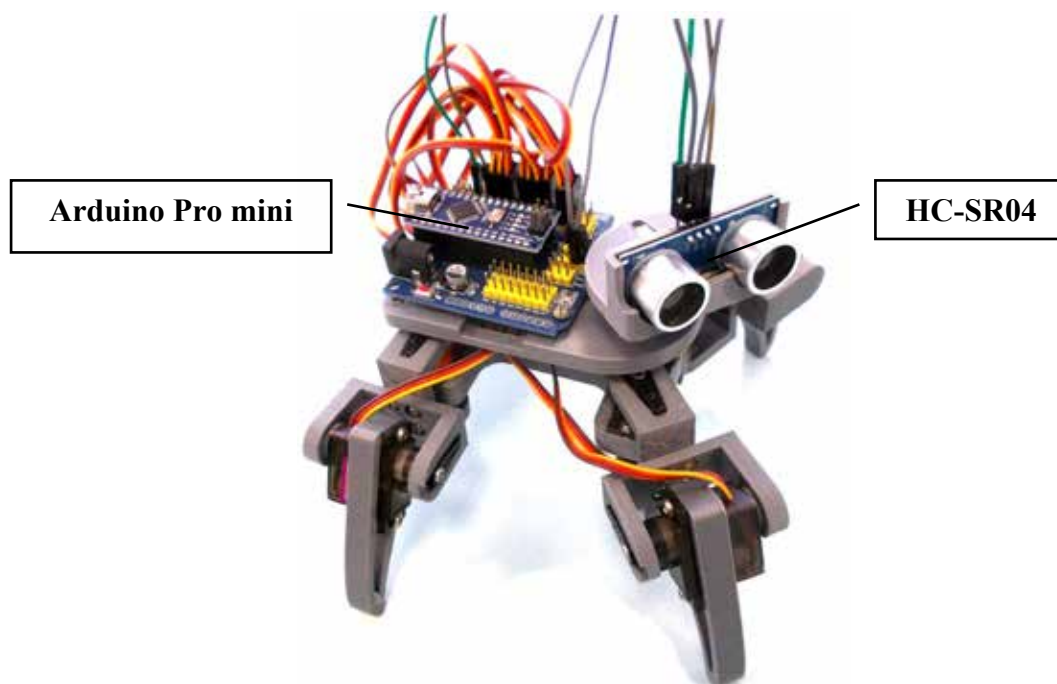


Рис. 2. Конструкція крокуючого SMARS-робота

Висновки і перспективи подальших досліджень. Як переконає досвід, поєднання можливостей засобів освітньої робототехніки, тривимірного прототипування та програмування мікроконтролерів відкриває широкі можливості для вивчення питань технологічного характеру для активізації пізнавальної

діяльності здобувачів освіти. У процесі проєктної роботи розвиваються конструкторські й творчі здібності, формуються основи фахової та цифрової компетентності. Перспективи подальших досліджень вбачаємо у розвитку проєктної роботи щодо конструювання SMARS-платформ.

ЛІТЕРАТУРА:

1. About Arduino. URL: <https://www.arduino.cc/en/about>
2. Завалевський Ю., Гущина Н., Василяшко І., Коршунова О., Патрикєєва О. Створення педагогічних умов для впровадження дослідницького методу навчання з використанням ІТ- та STEM-технологій у закладах загальної середньої освіти. *Наукові записки Малої академії наук України*. № 2-3(21-22). 2021. С. 50–60. URL: <http://www.snman.science/index.php/sn/article/download/80/76>
3. Беглова Н.М., Беглов Я.І., Бегов К.К. Застосування платформи Arduino для вивчення принципів програмування зі школи до університету. *Proceedings of XI International Scientific and Practical Conference Berlin, Germany*. 1-3 July 2024. С. 39–52 URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/07/CURRENT-CHALLENGES-OF-SCIENCE-AND-EDUCATION-1-3.07.2024.pdf#page=39>
4. Каталог освітніх програм та вибіркового освітніх компонентів. URL: <https://vnu.edu.ua/uk/all-educations>
5. Мартинюк О. С. Тривимірне прототипування як складник STEM-технологій у конструктивно-технічній і науково-дослідній роботі студентів та учнів. *Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. Серія педагогічна / [редкол.: П. С. Атаманчук (голова, наук. ред.) та ін.]*. 2019. Випуск 25. Кам'янець-Подільський. С. 61–64.
6. Мартинюк О.С. Особливості підготовки здобувачів освіти з використанням робототехнічних STEM-проєктів. *Проблеми та інновації в математичній, цифровій, природничій і професійній освіті: збірник матеріалів XVII-ї Міжнародної науково-практичної онлайн-інтернет конференції*, м. Кропивницький, 20-27 червня 2024 року / Відп. ред. М. І. Садовий. 2024. С. 129–131.
7. Arduino controlled 2-joint 8-servo 4-legged Walking Robot. URL: <https://www.thingiverse.com/thing:4905975>
8. В. Кошовий Особливості впровадження STEM-проєктів робототехніки на базі контролера Arduino на уроках інформатики. *Науково-методичний, інформаційно-освітній журнал*, 2024. № 2(101). С. 53–63 URL: <https://doi.org/10.54662/veresen.2.2024.05>
9. Остапчук С.А., Садовий М.І. До проблеми використання платформи Arduino у вивченні робототехніки. *Наукові записки. Центральнотериторіального державного університету імені Володимира Винниченка Серія «Педагогічні науки»*. Кропивницький, 2018. Вип. 168. С. 178–181.
10. Про затвердження плану заходів щодо реалізації Концепції розвитку природничо-математичної освіти (STEM-освіти) до 2027 року. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-planu-zahodiv-sh-a131r>
11. Садовий М.І., Соменко Д.В., Трифонова О.М. Робототехнічні комплекти в освітньому процесі. *Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. Серія педагогічна*. Кам'янець-Подільський, 2021. Вип. 27. С. 125–128.
12. Столяр, Т., Сербин, Б. Використання технологій Arduino в робототехніці на уроках інформатики. *IX Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Сучасні інформаційні технології в освіті та науці»*, 21-22 листопада 2024 р., Житомир. С. 237–239.
13. STEM-освіта. URL: <https://imzo.gov.ua/stem-osvita/>
14. David T. Butterworth Teaching C/C++ programming with LEGO Mindstorms. 3rd International Conference on Robotics in Education (RIE). Prague, Czech Republic. September 2012. URL: https://www.researchgate.net/publication/327903430_Teaching_CC_programming_with_LEGO_Mindstorms
15. Eguchi A. Robotics as a Learning Tool for Educational Transformation. *Proceedings of 4th International Workshop Teaching Robotics, Teaching with Robotics & 5th International Conference Robotics in Education*, Padova (Italy), 24-37. URL: http://www.terecop.eu/TRTWR-RIE2014/files/00_WFr1/00_WFr1_04.pdf
16. SMARS modular robot. URL: <https://www.thingiverse.com/thing:2662828>
17. What is SMARS? URL: https://www.smarsfan.com/about/what_is_smars

REFERENCES:

1. About Arduino. URL: <https://www.arduino.cc/en/about>
2. Zavalevskyi, Yu., Hushchyna, N., Vasylyashko, I., Korshunova, O., & Patrykeieva, O. (2021). Stvorennia pedahohichnykh umov dlia vprovadzhenia doslidnytskoho metodu navchannia z vykorystanniam IT- ta STEM-tekhnologii u zakladakh zahalnoi serednoi osvity [Creating Pedagogical Conditions for Implementing the Inquiry-Based Learning Method Using IT and STEM Technologies in General Secondary Education Institutions]. *Naukovi zapysky Maloi akademii nauk Ukrainy*. № 2-3(21-22). S. 50–60. URL: <http://www.snman.science/index.php/sn/article/download/80/76>
3. Beglova, N.M., Beglov, Ya.I., & Begov, K.K. (2024). Zastosuvannia platformy Arduino dlia vyvchennia pryntsyviv prohramuvannia zi shkoly do universytetu [Application of the Arduino Platform for Learning Programming Principles from School to University]. Proceedings of XI International Scientific and Practical Conference Berlin, Germany. S. 39–52. Retrieved from: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/07/CURRENT-CHALLENGES-OF-SCIENCE-AND-EDUCATION-1-3.07.2024.pdf#page=39>
4. Kataloh osvitnikh prohram ta vybirkovykh osvitnikh komponentiv [Catalogue of Educational Programs and Elective Educational Components]. Retrieved from: <https://vnu.edu.ua/uk/all-educations>
5. Martyniuk, O. (2019). Tryvymirne prototypuvannia yak skladnyk STEM-tekhnologii u konstruktivno-tekhnichnii i nauko-doslidnii roboti studentiv ta uchniv [Three-Dimensional Prototyping as a Component of STEM Technologies in Constructive-Technical and Research Activities of Students and Pupils]. *Zbirnyk naukovykh prats Kamianets-Podilskoho natsionalnoho universytetu imeni Ivana Ohienka. Seriiia pedahohichna / [redkol.: P. S. Atamanchuk (holova, nauk. red.) ta in.]. Vypusk 25. Kamianets-Podilskyi*. S. 61-64.
6. Martyniuk, O. (2024). Osoblyvosti pidhotovky zdobuvachiv osvity z vykorystanniam robototekhnichnykh STEM-proiektiv [Peculiarities of Training Learners Using Robotic STEM Projects]. *Problemy ta innovatsii v matematychnii, tsyfrovii, pryrodnychii i profesiinii osviti: zbirnyk materialiv KhVII-yi Mizhnarodnoi nauko-praktychnoi onlain-internet konferentsii, m. Kropyvnytskyi, 20-27 chervnia 2024 roku / Vidp. red. M. I. Sadovyi*. 2024, S.129-131.
7. Arduino controlled 2-joint 8-servo 4-legged Walking Robot. Retrieved from: <https://www.thingiverse.com/thing:4905975>
8. Koshovyi V. (2024) Osoblyvosti vprovadzhenia STEM-proiektiv robototekhniki na bazi kontrolera Arduino na urokakh informatyky [Peculiarities of Implementing Robotics STEM Projects Based on the Arduino Controller in Informatics Lessons]. *Nauko-metodychnyi, informatsiino-osvitnii zhurnal*, 2(101), 53–63. Retrieved from: <https://doi.org/10.54662/veresen.2.2024.05>
9. Ostapchuk, S., & Sadovyi, M. (2018). Do problemy vykorystannia platformy Arduino u vyvchenni robototekhniki [On the Issue of Using the Arduino Platform in Robotics Education]. *Naukovi zapysky. Tsentralnoukrainskoho derzhavnoho universytetu imeni Volodymyra Vynnychenka Seriiia «Pedahohichni nauky»*. Kropyvnytskyi, 168, 178–181.
10. Pro zatverdzhennia planu zakhodiv shchodo realizatsii Kontseptsii rozvytku pryrodnycho-matematychnoi osvity (STEM-osvity) do 2027 roku [On the Approval of the Action Plan for the Implementation of the Concept for the Development of Science and Mathematics Education (STEM Education) until 2027]. Retrieved from: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennia-planu-zahodiv-sh-a131r>
11. Sadovyi, M., Somenko, D., & Tryfonova, O. (2021). Robototekhnichni komplekty v osvitnomu protsesi [Robotics Kits in the Educational Process]. *Zbirnyk naukovykh prats Kamianets-Podilskoho natsionalnoho universytetu imeni Ivana Ohienka. Seriiia pedahohichna*. Kamianets-Podilskyi, 27, 125–128.
12. Stoliar, T. & Serbyn, B. (2024). Vykorystannia tekhnologii Arduino v robototekhnitsi na urokakh informatyky [Using Arduino Technologies in Robotics during Informatics Lessons]. *IKh Vseukrainska nauko-praktychna konferentsiia z mizhnarodnoiu uchastiu «Suchasni informatsiini tekhnologii v osviti ta nautsi»*, 21–22 lystopada 2024 r., Zhytomyr.
13. STEM-osvita. Retrieved from: <https://imzo.gov.ua/stem-osvita/>
14. David, T. (2012). Butterworth Teaching C/C++ programming with LEGO Mindstorms. 3rd International Conference on Robotics in Education (RIE). Prague, Czech Republic. September 2012. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/327903430_Teaching_CC_programming_with_LEGO_Mindstorms
15. Eguchi, A. (2014). Robotics as a Learning Tool for Educational Transformation. Proceedings of 4th International Workshop Teaching Robotics, Teaching with Robotics & 5th International Conference Robotics in Education, Padova (Italy), p. 24–37. Retrieved from: http://www.terecop.eu/TRTWR-RIE2014/files/00_WFr1/00_WFr1_04.pdf.
16. SMARS modular robot. Retrieved from: <https://www.thingiverse.com/thing:2662828>
17. What is SMARS? Retrieved from: https://www.smarsfan.com/about/what_is_smars

УДК 538.945

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-8>**Ігор МАШЕВСЬКИЙ**

аспірант кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

Бібліографічний опис статті: Машевський, І. (2025). Мультиспектральні лідари та їх використання. *Фізика та освітні технології*, 1, 62–68, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-8>

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНІ ЛІДАРИ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

У статті висвітлено теоретичні засади функціонування мультиспектральних лідарних (МСЛ) систем, їхню апаратну реалізацію, методологічні підходи до збору та обробки даних, а також охарактеризовано ключові напрями практичного застосування цієї технології. Розглянуто принципову архітектуру МСЛ, яка включає джерела випромінювання на різних довжинах хвиль, сканувальні механізми, приймальні оптичні модулі, фотодетекторні системи, а також допоміжні елементи навігаційного забезпечення (GPS/IMU). Окрему увагу приділено використанню суперконтинуумних лазерів і методам подвоєння частоти для розширення спектрального діапазону. Зазначено, що основною перевагою МСЛ є можливість одночасного отримання просторової та спектральної інформації при збереженні високої просторової роздільної здатності.

Проаналізовано потенціал МСЛ у забезпеченні точного спектрального розрізнення матеріалів та структурних елементів на основі спектрально-чутливих відбитих сигналів. Описано алгоритми цифрової обробки сигналів, включаючи методи радіометричної калібровки, компенсації атмосферних спотворень, а також машинного навчання, які застосовуються для класифікації, сегментації та візуалізації багатовимірних даних. Наведені емпіричні результати свідчать про високу точність розпізнавання об'єктів за даними МСЛ, що істотно перевищує показники традиційних лідарних систем і пасивних мультиспектральних зображень.

У роботі окреслено основні прикладні напрями використання мультиспектральних лідарів, зокрема: агромоніторинг, лісознавство, геодезія та картографія, екологічний моніторинг, урбаністика, геологія і археологія. Показано, що синергія просторово-спектральних даних відкриває нові можливості в інтерпретації складних природних і антропогенних систем.

Проаналізовано ринкові тенденції, які свідчать про зростання інвестицій у сферу МСЛ-технологій та інфраструктури для їх інтеграції у мультисенсорні платформи. Зокрема, очікується суттєве зростання світового ринку лідарних систем, що також охоплює мультиспектральний сегмент.

Ключові слова: мультиспектральний лідар, дистанційне зондування, спектральна рефлектансія, хмара точок, цифрова обробка сигналів, геоінформаційні системи, машинне навчання, екологічний моніторинг.

Igor MASHEVSKY

Postgraduate Student at the Svidzinsky Department of Theoretical and Computer Physics, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

To cite this article: Mashevsky, I. (2025). Multyspektralni lidary ta yikh vykorystannya [Multispectral LiDAR Systems and Their Applications]. *Physics and Educational Technology*, 1, 62–68, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-8>

MULTISPECTRAL LIDAR SYSTEMS AND THEIR APPLICATIONS

The article presents the theoretical foundations of the functioning of multispectral LiDAR (MSL) systems, their hardware implementation, methodological approaches to data acquisition and processing, as well as outlines the key areas of practical application of this technology. The fundamental architecture of MSL is considered, which includes radiation sources operating at various wavelengths, scanning mechanisms, optical receiving modules, photodetector systems, and auxiliary navigation components (GPS/IMU). Particular attention is paid to the use of supercontinuum lasers and frequency doubling techniques to expand the spectral range. It is emphasized that a key advantage of MSL is the capability of simultaneous acquisition of both spatial and spectral information while maintaining high spatial resolution.

The potential of MSL in providing accurate spectral discrimination of materials and structural elements based on spectrally sensitive reflected signals is analyzed. The article describes digital signal processing algorithms, including radiometric calibration, atmospheric distortion compensation, and machine learning techniques applied for classification, segmentation, and visualization of multidimensional data. Empirical results indicate a high object recognition accuracy

using MSL data, which significantly exceeds the performance of traditional single-wavelength LiDAR systems and passive multispectral imagery.

The study outlines the main applied directions for the use of multispectral LiDAR, including agro-monitoring, forestry, geodesy and cartography, environmental monitoring, urban planning, geology, and archaeology. It is demonstrated that the synergy of spatial and spectral data opens new possibilities for interpreting complex natural and anthropogenic systems.

Market trends are also analyzed, highlighting a steady increase in investments in the field of MSL technologies and the infrastructure needed for their integration into multisensor platforms. In particular, significant growth of the global LiDAR market is anticipated, which also encompasses the multispectral segment.

Key words: multispectral LiDAR, remote sensing, spectral reflectance, point cloud, digital signal processing, geographic information systems, machine learning, environmental monitoring.

Вступ. Технології дистанційного зондування набувають дедалі більшого значення як інструмент отримання інформації про поверхню Землі без фізичного контакту (Leah A. Wasser, 2024). Ці технології є критично важливими для широкого спектру застосувань, включаючи моніторинг навколишнього середовища, управління ресурсами та міське планування. У сучасній практиці дистанційного зондування спостерігається тенденція до поєднання геометричної інформації, яку традиційно збирають лідарні датчики, з спектральною інформацією, що отримується з оптичних зображень (Takhtkeshha, 2024). Такий підхід дозволяє досягти значно точніших результатів у різноманітних задачах, що свідчить про зростаючу потребу в збагачених наборах даних, які інтегрують просторові та спектральні виміри.

Поява мультиспектральних лідарних (МСЛ) систем, що працюють на різних довжинах хвиль, стала революційним кроком у сфері одночасного отримання інформації про висоту та інтенсивність відбиття (Takhtkeshha, 2024). Ця одночасність є ключовою перевагою МСЛ над методами, які отримують просторові та спектральні дані окремо, оскільки дозволяє уникнути потенційних невідповідностей та забезпечує узгоджені умови навколишнього середовища під час збору даних. Технологія МСЛ вже успішно застосовується для великомасштабного картографування у різних галузях (Takhtkeshha, 2024), що підкреслює її універсальність та ефективність у наданні детальної інформації для різних застосувань.

Дослідження показали, що використання даних МСЛ забезпечує значно вищу точність класифікації об'єктів. В одному з досліджень точність класифікації з використанням даних МСЛ досягла 88,7%, що на 9,8%–39,2% перевищувало показники однохвильового лідара та на 4,2% – мультиспектральних зображень (Gong,

2015). Ці кількісні дані підтверджують вищу ефективність МСЛ у розрізненні об'єктів. МСЛ пропонує активну спектроскопію, що дозволяє проводити вимірювання навіть у постійно затінених областях або безпосередньо аналізувати склад поверхні (Jonathan, 2005). На відміну від пасивного мультиспектрального зображення, МСЛ не залежить від сонячного освітлення та відбивної здатності поверхні, забезпечуючи стабільні дані незалежно від умов освітлення (Fleming, 2015). Крім того, МСЛ здатний надавати спектральні дані з високою просторовою роздільною здатністю (на рівні листя) у великих масштабах (до рівня насаджень), що раніше було складно досягти без руйнівного відбору проб (Kaasalainen, 2019). Це відкриває нові можливості для неінвазивних та широкомасштабних екологічних досліджень.

Різні галузі промисловості, включаючи сільське господарство, лісове господарство та землеустрій, можуть отримати значну вигоду від додаткової інформації, яку фіксує мультиспектральне зображення і яка часто залишається непоміченою для людського ока або стандартних камер. Це підкреслює зростаюче визнання цінності детальної спектральної інформації для прийняття обґрунтованих рішень. Зростаючий інтерес до сприйняття та оцифрування навколишнього середовища покладається на відповідні методи дистанційного збору даних, і мультиспектральний лідар є перспективним рішенням для одночасного доступу до геометричної інформації та інформації про матеріали (Han, 2022). Це свідчить про зростаючий попит на технології, які можуть забезпечити всебічне цифрове представлення світу.

Сучасні тенденції розвитку мультиспектральних лідарних систем свідчать про поступове досягнення технічної зрілості наземних мультиспектральних лідарних інструментів для комерційного застосування (Kaasalainen,

2019). Це засвідчує перехід від науково-дослідних інструментів до більш доступних та зручних у використанні комерційних систем. Спостерігається тенденція до поєднання лідарів з іншими датчиками, такими як системи позиціонування та пасивні камери, для створення мультисенсорних екосистем з метою покращення ситуаційної обізнаності, особливо для автономних транспортних засобів (Kaasalainen, 2019). Це вказує на те, що МСЛ розглядається не як окреме рішення, а як компонент у ширшому наборі сенсорних технологій. Ринок лідарних технологій демонструє значне зростання, з прогнозами досягнення 7,94 мільярда доларів США до 2030 року (LiDAR Market Size, 2022) та 15,83 мільярда доларів США до 2034 року (LiDAR Market Size, 2025). Хоча ці цифри представляють загальний ринок лідарів, вони вказують на сильну тенденцію до зростання, яка, ймовірно, включає і мультиспектральний сегмент. Ринок мультиспектральних камер також зростає і, за оцінками, досягне 2,2 мільярда доларів США до 2028 року (Multispectral Camera Market by Application, 2023), що свідчить про ширший інтерес та інвестиції в мультиспектральні сенсорні технології, які доповнюють МСЛ.

Принцип дії мультиспектральних лідарів.

Мультиспектральна лідарна система зазвичай включає джерело лазерного випромінювання, що генерує імпульси на кількох довжинах хвиль, скануючий механізм для спрямування лазерного променя, оптичний приймальний блок для збору розсіяного назад світла та блок детектування з фотодіодами та оцифровувачем для реєстрації інтенсивності відбитих сигналів на кожній довжині хвилі (Kaasalainen, 2019). Система також містить GPS для отримання інформації про місцезнаходження та інерціальний вимірювальний блок (IMU) для визначення орієнтації датчика (Leah, 2024). У деяких перетових системах використовуються волоконні підсилювачі для генерації лазерних імпульсів на певних довжинах хвиль, таких як 1064 нм та 1570 нм. Методи подвоєння частоти можуть розширити діапазон довжин хвиль у видиму частину спектра (Jonathan, 2005).

Технологія LiDAR працює за принципом випромінювання лазерних імпульсів та вимірювання часу, за який відбите світло повертається до датчика (принцип часу прольоту)

(Leah, 2024). Цей час прольоту використовується для розрахунку відстані до цілі. Також реєструється інтенсивність відбитого світла на кожній довжині хвилі, що надає інформацію про відбивну здатність цілі в цих конкретних спектральних діапазонах (Takhtkeshha, 2024). Мультиспектральний лідар розширює цей принцип, використовуючи кілька довжин хвиль лазерного випромінювання (зазвичай у видимому та ближньому інфрачервоному спектрі) для зондування цілі (Takhtkeshha, 2024). Вибір довжин хвиль є критично важливим, оскільки різні матеріали по-різному відбивають та поглинають світло в різних частинах спектра.

У мультиспектральних лідарних системах можуть використовуватися кілька окремих лазерів, кожен з яких випромінює на певній довжині хвилі, або суперконтинуумний лазер, який генерує широкий спектр світла, з якого за допомогою фільтрів або інших оптичних компонентів вибираються конкретні довжини хвиль (Takhtkeshha, 2024). Використання кількох лазерів забезпечує простоту та порівняльну безпеку для очей і співвідношення сигнал/шум, подібне до традиційних лідарів, але може обмежувати масштабованість та ускладнювати вирівнювання (Kaasalainen, 2019). Суперконтинуумні лазери можуть охоплювати більші спектральні діапазони та забезпечувати одночасні вимірювання на кількох довжинах хвиль, але стикаються з проблемами досягнення безпечних для очей рівнів потужності для дистанційних вимірювань (Kaasalainen, 2019). Детектування зазвичай здійснюється за допомогою фотодіодів (таких як лавинні фотодіоди – APD), які перетворюють прийняте світло в електричний сигнал, та швидких оцифровувачів для запису форми хвилі імпульсів, що повертаються, на кожній довжині хвилі (Kaasalainen, 2019).

Під час збору даних МСЛ-система одночасно реєструє відстань до цілі та інтенсивність розсіяного назад світла на кожній зі своїх робочих довжин хвиль (Takhtkeshha, 2024). Це призводить до створення тривимірної хмари точок, де кожна точка має пов'язані значення спектральної інтенсивності (Kaasalainen, 2019). Для отримання точної інформації про відстань та інтенсивність використовуються методи обробки сигналів для аналізу форми хвилі імпульсів, що повертаються (Kaasalainen,

2019). Радіометрична калібровка та корекція є важливими етапами обробки для врахування системних спотворень, змін висоти рельєфу, атмосферного поглинання та впливу відстані й кута падіння на дані інтенсивності, забезпечуючи точне відображення спектральної відбивної здатності цілі значеннями інтенсивності (Kaasalainen, 2019). Реєстрація спектральних даних забезпечує точне вирівнювання спектральної інформації з різних довжин хвиль з просторовими даними. Передові методи обробки, включаючи алгоритми машинного навчання, дедалі частіше використовуються для таких завдань, як сегментація хмари точок, класифікація та вилучення ознак на основі як просторових, так і спектральних характеристик (Gong, 2015).

Застосування мультиспектральних лідарів. Сільське господарство: Мультиспектральне зображення, часто в поєднанні з лідаром, використовується для точного моніторингу посівів, виявлення дефіциту поживних речовин, ранніх ознак стресу, а також спалахів хвороб або шкідників (Altmann, 2015). Це дозволяє своєчасно вживати цільових заходів. Лідар забезпечує точне 3D-картографування сільськогосподарських угідь, допомагаючи в аналізі рельєфу, нівелюванні земель, аналізі ґрунтів та плануванні зрошення (Kexin Zheng, 2023). Поєднання мультиспектральних даних з лідаром дозволяє оптимізувати зрошення та управління водними ресурсами шляхом виявлення зон водного стресу та розуміння потоку води на основі топографії (Altmann, 2015). МСЛ може допомогти прогнозувати врожайність шляхом точного вимірювання висоти рослин, щільності пологів та розподілу біомаси (Altmann, 2015). Технологія підтримує стале сільське господарство, забезпечуючи точне внесення добрив та пестицидів, зменшуючи відходи та вплив на навколишнє середовище (Kexin Zheng, 2023).

Екологія та лісове господарство: Мультиспектральне зображення допомагає розрізняти різні види рослин та типи лісів на основі їхніх спектральних властивостей відбиття (Han, 2022). Лідар використовується для моніторингу лісового вуглецю, екосистем та ресурсів, надаючи дані про висоту пологів, покриття, біомасу та структуру (Olsen, 2017). Мультиспектральний лідар дозволяє одночасно спостерігати як структурні, так і відбивні властивості, що дає

змогу відокремлювати деревні та листяні елементи пологів та потенційно допомагає у класифікації лісів за станом та видами (Takhtkeshha, 2024). Його можна використовувати для картографування фотосинтетичної здатності та здоров'я рослин шляхом визначення вмісту хлорофілу за спектральними індексами (Kaasalainen, 2019). МСЛ може допомогти виявляти та контролювати зміни в лісах з часом, такі як поширення хвороб або наслідки вирубки (Han, 2022).

Картографія та геодезія: Лідар є революційною технологією в аналізі рельєфу, забезпечуючи високоточні топографічні дані для створення детальних 3D-карт та моделей (Kexin Zheng, 2023). Мультиспектральний лідар кардинально змінює одночасне отримання інформації про висоту та інтенсивність, що є критично важливим для великомасштабного картографування в різних галузях (Takhtkeshha, 2024). Лідар здатний проникати крізь густу рослинність, щоб виявити справжню топографію землі під нею, що є важливим для точного картографування в заліснених районах. Висока точність лідарних даних є важливою для планування інфраструктури, управління ресурсами та різних геодезичних застосувань.

Моніторинг навколишнього середовища: Мультиспектральний лідар покращує завдання класифікації, надаючи детальну інформацію про різні екологічні умови та склад різних матеріалів. Його можна використовувати для розрізнення забруднення в снігу, виявлення замаскованих цілей та відокремлення штучних об'єктів від рослинності (Kaasalainen, 2019). Лідарні системи є ефективними інструментами для моніторингу екологічних змін у великих масштабах, включаючи ідентифікацію зсувів, картографування під час надзвичайних ситуацій та моніторинг ерозії. Мультиспектральне зображення допомагає оцінювати рослинний покрив, контролювати зміни у землекористуванні та виявляти інвазивні види у чутливих екосистемах (Binhui Wang, 2020). Його також можна використовувати для моніторингу параметрів якості води, таких як концентрація хлорофілу, та виявлення джерел забруднення (Binhui Wang, 2020).

Міське планування та інфраструктура: Лідар надає детальні 3D-моделі міського середовища, підтримуючи ініціативи розумних міст, цифрові двійники та планування

інфраструктури. Мультиспектральне зображення може оцінювати стан міських зелених зон, виявляти теплові острови та контролювати стан інфраструктури, такої як дороги та мости (Olsen, 2017). Лідар можна використовувати для оцінки висоти стоячої води на дорогах, що важливо для досліджень руйнування дорожнього покриття (Shi, 2021). Він також допомагає в управлінні комунальними та енергетичними лініями, виявляючи заростання рослинності (Kashani, 2015).

Геологія та гірнича справа: Лідар ефективний для оцінки стійкості скельних порід та збору інформації про геометрію поверхні скель (Vierhub-Lorenz, 2022). Мультиспектральний лідар можна використовувати для автоматизованої віртуальної геології оголень, допомагаючи в ідентифікації типів порід та картографуванні вмісту мінералів. Він має потенціал замінити візуальну ідентифікацію при розділенні мінералів від пустої породи на шахтах (Kaasalainen, 2019). Гіперспектральне зображення, часто інтегроване з лідаром, дозволяє проводити детальну розвідку та картографування корисних копалин (Kaasalainen, 2019).

Археологія та культурна спадщина: Лідар став важливим інструментом для виявлення та документування прихованих археологічних об'єктів, споруд та артефактів під поверхнею Землі, особливо під лісовим покривом.

Мультиспектральне зображення допомагає виявляти поховані споруди та артефакти, аналізуючи ледь помітні відмінності у рослинності та ґрунті (Olsen, 2017). Поєднання лідара з мультиспектральними даними може забезпечити більш повне розуміння археологічних ландшафтів. Лідар може створювати 3D-моделі археологічних об'єктів та історичних пам'яток з високою роздільною здатністю (Kashani, 2015).

Висновки. Мультиспектральні лідари являють собою передову технологію дистанційного зондування, яка поєднує високу точність просторових вимірювань з інформацією про спектральні властивості об'єктів. Здатність одночасно отримувати ці два типи даних відкриває широкі можливості для різноманітних застосувань у сільському господарстві, екології, картографії, моніторингу навколишнього середовища, міському плануванні, геології, гірничій справі та археології. Постійний розвиток технологій МСЛ, зростаюча комерційна доступність та тенденція до інтеграції з іншими сенсорами свідчать про значний потенціал цієї технології для майбутніх досліджень та практичного використання. Подальші дослідження будуть спрямовані на вдосконалення точності, розширення спектральних діапазонів та розробку ефективних методів обробки даних для розкриття повного потенціалу мультиспектральних лідарів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Leah A. Wasser. The Basics of LiDAR – Light Detection and Ranging – Remote Sensing. NSF NEON. 2024. URL: <https://www.neonscience.org/resources/learning-hub/tutorials/lidar-basics> (дата звернення 26.03.2025).
2. Takhtkeshha N., Mandlbürger G., Remondino F., Hyypä J. Multispectral Light Detection and Ranging Technology and Applications: A Review *Sensors*. 2024. Vol.24 № 5. 1669. <https://doi.org/10.3390/s24051669>.
3. Gong W., Sun J., Shi S., Yang J., Du L., Zhu B., Song S. Investigating the Potential of Using the Spatial and Spectral Information of Multispectral LiDAR for Object Classification. *Sensors* 2015. Vol.15. № 9. P. 21989–22002. <https://doi.org/10.3390/s150921989>.
4. Jonathan A. R., Kujawski J., Obland M., Ott M. Multi spectral lidar (MSL). Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing. Edited by Singh, Upendra N. Proceedings of the SPIE. 2005. Vol. 5984. p. 132–139. <https://doi.org/10.1117/12.627148>.
5. Fleming S., Woodhouse I. H., Cottin A. Bringing Colour to Point Clouds. *Hip International*. 2015. Vol. 29 № 2. p. 22–25 URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84923250731&origin=inward&txGid=874135284f3f1efb22a59f85bcb0972>.
6. Kaasalainen, S. 2019. The Multispectral Journey of Lidar. URL: <https://www.gim-international.com/content/article/the-multispectral-journey-of-lidar> (accessed on 26.03.2025).
7. Han Y., Salido-Monzú D., Wieser A. Comb-based multispectral LiDAR providing reflectance and distance spectra. *Opt. Express*. 2022. Vol. 30, p. 42362–42375. <https://doi.org/10.1364/OE.473466>
8. LiDAR Market Size, Growth, Share, Analysis, Forecast, 2023-2030. *Fortune Business Insights*. 2022. URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/light-detection-and-ranging-lidar-market-101969> (accessed on 26.03.2025).
9. LIDAR Market Size, Share, and Trends 2025 to 2034. 2025. *Precedence Research*. URL: <https://www.precedenceresearch.com/lidar-market> (accessed on 26.03.2025).

10. Multispectral Camera Market by Application. Industry Report. 2023. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/multispectral-camera-market-142623484.html> (accessed on 26.03.2025).
11. Altmann Y., Wallace A., McLaughlin S. Spectral Unmixing of Multispectral Lidar Signals. *IEEE transactions on signal processing*. 2015. Vol. 63. № 20. P. 5525–5534. DOI:10.1109/TSP.2015.2457401
12. Kexin Zheng, Hongze Lin, Xuekai Hong, Hao Che, Xiaorui Ma, Xiaopeng Wei, Liang Mei. Development of a multispectral fluorescence LiDAR for point cloud segmentation of plants. *Opt. Express*. 2023. Vol. 31. p. 18613–18629. <https://doi.org/10.1364/OE.490004>
13. Olsen R. C., Metcalf J. P. Visualization and analysis of lidar waveform data. 2017. Proceedings Vol. 10191, Laser Radar Technology and Applications XXII; 101910I. <https://doi.org/10.1117/12.2276657>
14. Binhui Wang, Shalei Song, Wei Gong, Xiong Cao, Dong He. Zhenwei Chen, Xin Lin, Faquan Li, Jia Sun. Color Restoration for Full-Waveform Multispectral LiDAR Data. *Remote Sens*. 2020, 12(4), 593. <https://doi.org/10.3390/rs12040593>
15. Shi S., Bi S., Gong W., Chen B., Chen B., Tang X., Qu F., & Song S. Land Cover Classification with Multispectral LiDAR Based on Multi-Scale Spatial and Spectral Feature Selection. 2021. *Remote Sensing*, Vol.13. № 20. p. 4118. <https://doi.org/10.3390/rs13204118>
16. Kashani A.G., Olsen M.J., Parrish C.E., Wilson N. A Review of LIDAR Radiometric Processing: From Ad Hoc Intensity Correction to Rigorous Radiometric Calibration. *Sensors (Basel)*. 2015. Vol.15. № 11. p. 28099–28128. doi:10.3390/s151128099
17. Vierhub-Lorenz V, Kellner M, Zipfel O, Reiterer A. A Study on the Effect of Multispectral LiDAR Data on Automated Semantic Segmentation of 3D-Point Clouds. *Remote Sensing*. 2022. Vol.14. № 24. p.6349. <https://doi.org/10.3390/rs14246349>

REFERENCES:

1. Leah, A. (2024). *Wasser. The Basics of LiDAR – Light Detection and Ranging – Remote Sensing*. NSF NEON. Retrieved March 26, 2025, from <https://www.neonscience.org/resources/learning-hub/tutorials/lidar-basics>
2. Takhtkeshha, N., Mandlbürger, G., Remondino, F., & Hyypä, J. (2024). Multispectral Light Detection and Ranging Technology and Applications: A Review. *Sensors*, 24(5), 1669. <https://doi.org/10.3390/s24051669>
3. Gong, W., Sun, J., Shi, S., Yang, J., Du, L., Zhu, B., & Song, S. (2015). Investigating the Potential of Using the Spatial and Spectral Information of Multispectral LiDAR for Object Classification. *Sensors*, 15(9), 21989–22002. <https://doi.org/10.3390/s150921989>
4. Jonathan, A. R., Kujawski, J., Obland, M., & Ott, M. (2005). Multi spectral lidar (MSL). In U. N. Singh (Ed.), *Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing* (Vol. 5984, pp. 132–139). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.627148>
5. Fleming, S., Woodhouse, I. H., & Cottin, A. (2015). Bringing Colour to Point Clouds. *Hip International*, 29(2), 22–25. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84923250731>
6. Kaasalainen, S. (2019). *The Multispectral Journey of Lidar*. GIM International. Retrieved March 26, 2025, from <https://www.gim-international.com/content/article/the-multispectral-journey-of-lidar>
7. Han, Y., Salido-Monzú, D., & Wieser, A. (2022). Comb-based multispectral LiDAR providing reflectance and distance spectra. *Optics Express*, 30, 42362–42375. <https://doi.org/10.1364/OE.473466>
8. Fortune Business Insights. (2022). *LiDAR Market Size, Growth, Share, Analysis, Forecast, 2023–2030*. Retrieved March 26, 2025, from <https://www.fortunebusinessinsights.com/light-detection-and-ranging-lidar-market-101969>
9. Precedence Research. (2025). *LIDAR Market Size, Share, and Trends 2025 to 2034*. Retrieved March 26, 2025, from <https://www.precedenceresearch.com/lidar-market>
10. Markets and Markets. (2023). *Multispectral Camera Market by Application*. Retrieved March 26, 2025, from <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/multispectral-camera-market-142623484.html>
11. Altmann, Y., Wallace, A., & McLaughlin, S. (2015). Spectral Unmixing of Multispectral Lidar Signals. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 63(20), 5525–5534. <https://doi.org/10.1109/TSP.2015.2457401>
12. Zheng, K., Lin, H., Hong, X., Che, H., Ma, X., Wei, X., & Mei, L. (2023). Development of a multispectral fluorescence LiDAR for point cloud segmentation of plants. *Optics Express*, 31, 18613–18629. <https://doi.org/10.1364/OE.490004>
13. Olsen, R. C., & Metcalf, J. P. (2017). Visualization and analysis of lidar waveform data. *Laser Radar Technology and Applications XXII, Proceedings of SPIE*, 10191, 101910I. <https://doi.org/10.1117/12.2276657>
14. Wang, B., Song, S., Gong, W., Cao, X., He, D., Chen, Z., Lin, X., Li, F., & Sun, J. (2020). Color Restoration for Full-Waveform Multispectral LiDAR Data. *Remote Sensing*, 12(4), 593. <https://doi.org/10.3390/rs12040593>

15. Shi, S., Bi, S., Gong, W., Chen, B., Chen, B., Tang, X., Qu, F., & Song, S. (2021). Land Cover Classification with Multispectral LiDAR Based on Multi-Scale Spatial and Spectral Feature Selection. *Remote Sensing*, 13(20), 4118. <https://doi.org/10.3390/rs13204118>
16. Kashani, A. G., Olsen, M. J., Parrish, C. E., & Wilson, N. (2015). A Review of LIDAR Radiometric Processing: From Ad Hoc Intensity Correction to Rigorous Radiometric Calibration. *Sensors*, 15(11), 28099–28128. <https://doi.org/10.3390/s151128099>
17. Vierhub-Lorenz, V., Kellner, M., Zipfel, O., & Reiterer, A. (2022). A Study on the Effect of Multispectral LiDAR Data on Automated Semantic Segmentation of 3D-Point Clouds. *Remote Sensing*, 14(24), 6349. <https://doi.org/10.3390/rs14246349>

УДК 621.3

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-9>**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, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9433-7776>

SCOPUS AUTHOR ID: 55595635700

Андрій КЕВШИН

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 ID: <https://orcid.org/0000-0002-3581-8852>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422272900

Бібліографічний опис статті: Новосад, О., Кевшин, А. (2025). Фотоелектричні властивості діодних структур $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ та $\text{In-Ga/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$. *Фізика та освітні технології*, 1, 69–75, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-9>

ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДІОДНИХ СТРУКТУР $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ ТА $\text{In-Ga/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$

У роботі представлені результати досліджень фотовольтаїчних властивостей поверхнево-бар'єрних структур на основі монокристалічних плівок $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$, отриманих методами термічного вакуумного напилення напівпрозорих плівок In на поверхню $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ та механічним втиранням In-Ga евтектики в поверхню монокристалічних сколів $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$. Напівпрозорі індієві плівки наносили термічним вакуумним напиленням у ВУП-5 при тиску $1,3 \cdot 10^{-5}$ Па і температурі 300 К. Площа поверхні, на яку наносили напівпрозорий шар In , становила $\approx 3 \times 3$ мм².

При освітленні $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 8 мол. % ZnIn_2S_4 зі сторони $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ спостерігався один чітко виражений максимум. Енергетичне положення максимуму в спектрі фотонапруги відповідає енергії квантів світла $h\nu \approx 1,53$ еВ. При освітленні зразків зі сторони напівпрозорого шару In спостерігалось два максимуми з енергетичним положенням $h\nu \approx 1,44$ еВ та $h\nu \approx 1,60$ еВ. Аналогічні результати були і для діодних структур з 12 мол. % ZnIn_2S_4 . В зразках з 12 мол. % ZnIn_2S_4 при освітленні зі сторони монокристалічної підложки спостерігалось зміщення максимуму фотонапруги до 1,56 еВ, що добре узгоджується зі зростанням ширини забороненої зони $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ із збільшенням вмісту ZnIn_2S_4 .

Найвищими значеннями фотонапруги серед діодних структур $\text{In-Ga/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ мали структури з 12 мол. % ZnIn_2S_4 . При освітленні зі сторони напівпровідникової підложки спостерігався вузький максимум з енергетичним положенням $h\nu \approx 1,44$ еВ. При освітленні зі сторони In-Ga евтектики поряд з максимумом, обумовленим власними оптичними переходами ($h\nu \approx 1,68$ еВ), в довгохвильовій області спостерігалась менш виражена сходінка, обумовлена домішковим поглинанням світла, відповідальними за яке є V_{Cu} .

Маючи вузькі максимуми в спектрах фотонапруги, структури $\text{In(In-Ga)/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ можна використовувати як вузькосмугові приймачі світла. Енергетичне положення максимумів у спектрах фотонапруги залежить від складу монокристалів $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$, від способу одержання двошарової структури та від сторони структури, яка освітлювалась.

Ключові слова: напівпровідники, поверхнево-бар'єрні структури, фотонапруга, вакансії міді.

Oleksii NOVOSAD

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9433-7776>

SCOPUS AUTHOR ID: 55595635700

Andriy KEVSHYN

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, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3581-8852>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422272900

To cite this article: Novosad, O., Kevshyn, A. (2025). Fotoelektrychni vlastyvoli diodnykh struktur $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ та $\text{In-Ga/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$. [Photoelectric properties of $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ and $\text{In-Ga/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ diode structures]. *Physics and Educational Technology*, 1, 69–75, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-9>

PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ AND $\text{In-Ga/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ DIODE STRUCTURES

The paper presents the results of studies on the photovoltaic properties of surface-barrier structures based on monocrystalline $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ films. These structures were obtained using thermal vacuum deposition of semitransparent In films on the $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ surface and mechanical rubbing of In-Ga eutectic into the surface of monocrystalline $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ fractures. The semitransparent indium films were deposited by thermal vacuum evaporation in a VUP-5 system at a pressure of $1,3 \times 10^{-5}$ Pa and a temperature of 300 K. The surface area onto which the semitransparent In layer was deposited was approximately $\approx 3 \times 3 \text{ mm}^2$.

When illuminating the $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ structure with 8 mol.% ZnIn_2S_4 from the $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ side, a single well-defined maximum was observed. The energy position of the maximum in the photovoltage spectrum corresponds to the photon energy of $h\nu \approx 1,53 \text{ eV}$. When illuminating the samples from the side of the semitransparent In layer, two maxima were observed with energy positions of $h\nu \approx 1,44 \text{ eV}$ and $h\nu \approx 1,60 \text{ eV}$. Similar results were obtained for diode structures with 12 mol.% ZnIn_2S_4 . In samples with 12 mol.% ZnIn_2S_4 , when illuminated from the monocrystalline substrate side, a shift of the photovoltage maximum to 1,56 eV was observed, which correlates well with the increase in the band gap of $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ as the ZnIn_2S_4 content increases.

The highest photovoltage values among the diode structures $\text{In-Ga/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ were observed in structures with 12 mol.% ZnIn_2S_4 . When illuminated from the semiconductor substrate side, a narrow maximum with an energy position of $h\nu \approx 1,44 \text{ eV}$ was observed. When illuminated from the In-Ga eutectic side, alongside the maximum caused by intrinsic optical transitions ($h\nu \approx 1,68 \text{ eV}$), a less pronounced step was observed in the long-wavelength region. This step was attributed to impurity light absorption, primarily caused by V_{Cu} .

Having narrow maxima in the photovoltage spectra, the $\text{In(In-Ga)/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ structures can be used as narrow-band light receivers. The energy position of the maxima in the photovoltage spectra depends on the composition of the $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ monocrystals, the method of obtaining the bilayer structure, and the illuminated side of the structure.

Key words: semiconductors, surface-barrier structures, photovoltage, copper vacancies.

Актуальність проблеми. Відомо [Кудря, 2012; Кудря, 2013], що Сонце щосекунди випромінює $88 \cdot 10^{24}$ кал теплової енергії, що еквівалентно $1,02 \cdot 10^{20}$ кВт-год. На Землю потрапляє тільки частина цієї енергії – біля $1 \cdot 10^{18}$ кВт-год за рік, що майже у 100 разів перевищує енергетичні ресурси всіх розвіданих горючих копалин на Землі. Саме тому сонячна енергетика є одним із найбільш перспективних напрямів використання енергії відновлюваних джерел, що швидко розвивається. Перспективними матеріалами для розробки вискоєфективних сонячних елементів, завдяки високому значенню коефіцієнта поглинання світла та оптимальним значенням ширини забороненої зони, є напівпровідникові сполуки CuInS_2 та ZnIn_2S_4 . В останні роки з'являються наукові статті,

у яких розглядається можливість використання як базового матеріалу при створенні фотоелектроперетворювачів кристалічних твердих розчинів на основі CuInS_2 та ZnIn_2S_4 . Ці та ряд інших факторів обумовлюють розвиток нових технологій отримання та дослідження властивостей різних типів поверхнево-бар'єрних структур на основі даних сполук, саме це визначає актуальність нашої роботи.

Робота присвячена дослідженню фотовольтаїчних властивостей поверхнево-бар'єрних структур на основі монокристалічних плівок $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$, отриманих методами термічного вакуумного напилення напівпрозорих плівок In на поверхню $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ та механічним втиранням In-Ga евтектики в поверхню $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед класичних Si та Ge не менш актуальними для розвитку сонячної енергетики є напівпровідникові сполуки CuInS_2 . Експериментально досягнуті значення ефективності фотоелектричного перетворення тонкоплівкових елементів на основі CuInS_2 становлять 11-15 % (Klenk, 2005), а, згідно з теоретичними розрахунками, в *p-n*-гомопереходах на основі CuInS_2 ефективність фотоелектричного перетворення може становити 27-35 % [Meese, 1975]. Важливу роль для CuInS_2 як матеріалу поглинаючого шару фотоелектроперетворювача відіграє те, що CuInS_2 належить до халькопіритних прямозонних напівпровідників. Ширина забороненої зони CuInS_2 $E_g \approx 1,55$ eV, що є дуже близьким до максимуму спектрального розподілу випромінювання Сонця. Важливу роль для практичного використання відіграє високе значення коефіцієнта поглинання світла сполук CuInS_2 $\alpha > 10^5$ cm^{-1} . Деякі фізичні властивості сполук CuInS_2 - ZnIn_2S_4 представлені в роботах (Bozhko, 2015; Bozhko, 2016; Bozhko, 2015). Згідно з даними робіт (Bozhko, 2015; Bozhko, 2016; Bozhko, 2015), досліджувані монокристали належали до напівпровідників *n*-типу провідності. У роботі (Новосад, 2020) показано, що досліджувані в даній роботі поверхнево-бар'єрні структури In/CuInS_2 - ZnIn_2S_4 з напівпрозорим шаром індію мають випрямні властивості. Числові значення коефіцієнта випрямлення *K*, який визначався відношенням прямого струму до зворотного при сталій напрузі, становили 100, 1,5, 2 відповідно для структур In/CuInS_2 - ZnIn_2S_4 з 4, 8 і 12 мол.% ZnIn_2S_4 (Новосад, 2020).

Мета дослідження. Мета роботи полягала у створенні на поверхні монокристалічних плівок CuInS_2 - ZnIn_2S_4 термічним вакуумним напиленням In поверхнево-бар'єрних структур In/CuInS_2 - ZnIn_2S_4 ; у створенні механічним втиранням In-Ga евтектики в поверхню монокристалічних плівок CuInS_2 - ZnIn_2S_4 поверхнево-бар'єрних структур In-Ga/CuInS_2 - ZnIn_2S_4 ; дослідженні спектрального розподілу фотонапруги одержаних двошарових поверхнево-бар'єрних структур та фізичній інтерпретації отриманих результатів.

Методика та техніка експерименту. Для одержання поверхнево-бар'єрних структур використовувались монокристалічні

тверді розчини CuInS_2 - ZnIn_2S_4 з вмістом 4, 8, 12 та 16 мол. % ZnIn_2S_4 . Монокристали CuInS_2 - ZnIn_2S_4 були вирощені розчин-розплавним методом, методика вирощування монокристалів та синтез матеріалів описані в роботі (Bozhko, 2014; Bozhko, 2014).

Напівпрозорі індієві плівки наносили термічним вакуумним напиленням у ВУП-5 при тиску $1,3 \cdot 10^{-5}$ Па і температурі 300 К. Площа поверхні, на яку наносили напівпрозорий шар In, становила $\approx 3 \times 3$ mm^2 . Також нами досліджувались двошарові структури, отримані втиранням In-Ga евтектики в поверхню монокристалічних сколів CuInS_2 - ZnIn_2S_4 . З метою уникнення випадкових похибок та неточностей **із твердих розчинів CuInS_2 - ZnIn_2S_4 кожного компонентного складу використовувалось 2-3 монокристалічні сколи.** З роботи (Wagner, 1997) відомо, що монокристал CuInS_2 сколюється по кристалографічній площині (112). Саме тому ми вважали, що робочою поверхнею є саме ця кристалографічна площина.

Для експериментальних досліджень на структури наносили точкові електричні контакти зі струмопровідного клею з домішками срібла. Розміщення електричних контактів на поверхні структур та геометрія освітлення під час досліджень спектрального розподілу фотонапруги показані на рис. 1. Спектральний розподіл фотонапруги структур досліджувався при кімнатній температурі ($T \approx 300$ К).

Виклад основного матеріалу дослідження. Після одержання поверхнево-бар'єрних структур In/CuInS_2 - ZnIn_2S_4 під час дослідження якості електричних контактів нами було помічено фотовольтаїчний ефект, який спостерігався при освітленні даних структур як зі сторони монокристалічної підложки, так і зі сторони напівпрозорої плівки металу.

З кристалів твердих розчинів з вмістом з 4 мол. % ZnIn_2S_4 отримати сколи не вдалось, тому зразки вирізались та полірувались механічним методом в довільному кристалографічному напрямку. Саме це, на нашу думку, обумовило дуже низькі значення фотонапруги, які виявились на межі чутливості наших електровимірювальних приладів.

Результати дослідження спектрального розподілу фотонапруги представлено на рис. 2 – рис. 4. З рис. 2 видно, що при освітленні In/CuInS_2 - ZnIn_2S_4 з 8 мол. % ZnIn_2S_4 зі сторони

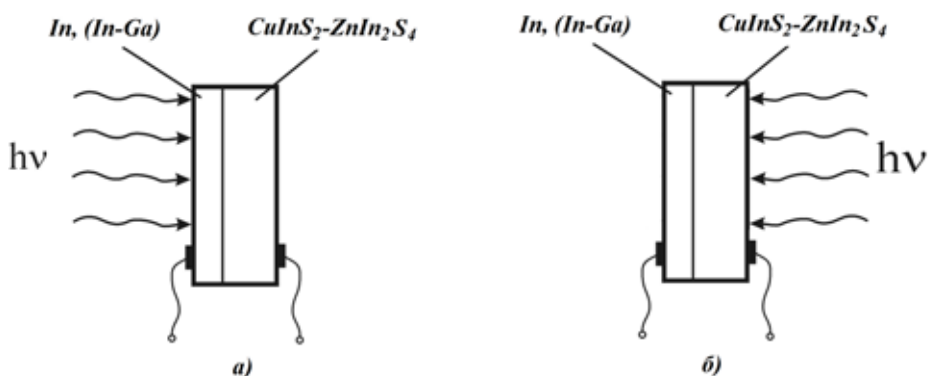


Рис. 1. Геометрія освітлення та розміщення електричних контактів поверхнево-бар'єрних структур на основі монокристалів $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$. а) освітлення зі сторони металу, б) освітлення зі сторони монокристалічної підложки

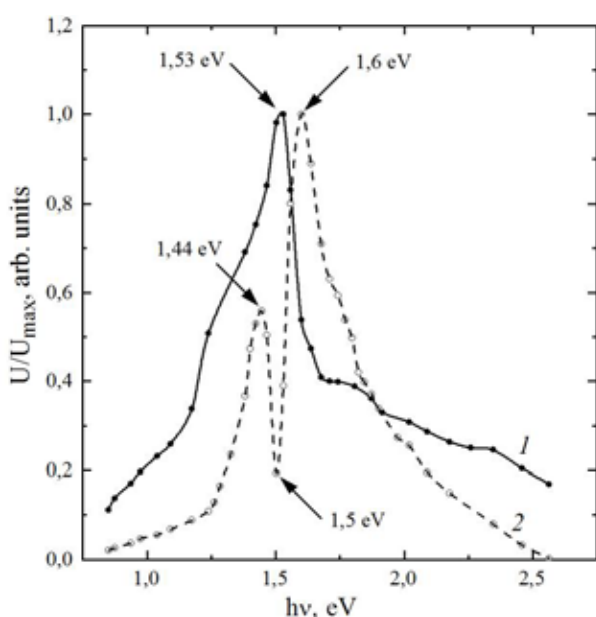


Рис. 2. Спектральний розподіл фотонапруги структури $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 8 мол. % ZnIn_2S_4 : 1 – освітлення зі сторони монокристалічної підложки; 2 – освітлення зі сторони плівки напівпрозорого In

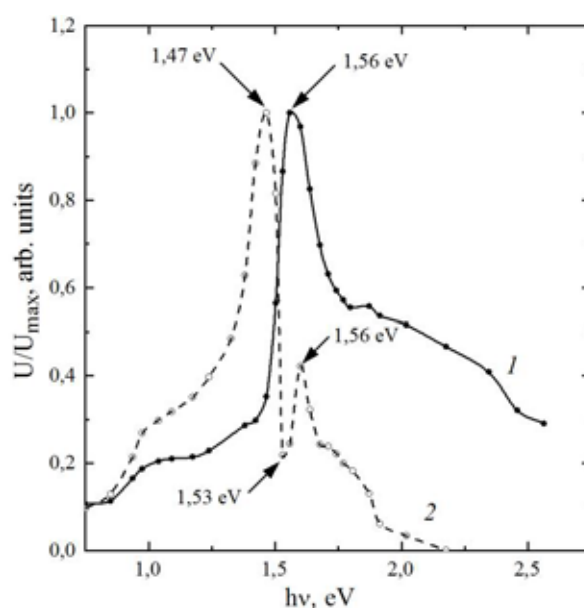


Рис. 3. Спектральний розподіл фотонапруги структури $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 12 мол. % ZnIn_2S_4 : 1 – освітлення зі сторони монокристалічної підложки; 2 – освітлення зі сторони плівки напівпрозорого In

$\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ особливістю спектрального розподілу фотонапруги є один чітко виражений максимум. Обчислене нами значення ширини максимуму на половині висоти становило ~ 175 меВ. Енергетичне положення максимуму спектра фотонапруги відповідає енергії квантів світла $h\nu \approx 1,53$ еВ. При освітленні зразків зі сторони напівпрозорого шару In спостерігалось два максимуми з енергетичним положенням $h\nu \approx 1,44$ еВ та $h\nu \approx 1,60$ еВ (рис. 2).

Слід відмітити, що значення $h\nu \approx 1,53$ еВ та $h\nu \approx 1,60$ еВ виявилось близьким до значення ширини забороненої зони $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$

з 8 мол. % ZnIn_2S_4 , яка оцінювалась зі спектрів фотопровідності в (Novosad, 2015). Тому можна припустити, що відповідальними за формування цих максимумів фотонапруги є власні оптичні переходи. З аналізу джерел (Bozhko, 2015; Bozhko, 2016; Bozhko, 2014) можна припустити, що відповідальними за формування максимуму з енергетичним положенням $h\nu \approx 1,44$ еВ є переходи електронів акцепторний рівень-зона провідності. Акцепторні рівні з таким енергетичним положенням обумовлюються вакансіями міді (V_{Cu}) (Bozhko, 2015; Bozhko, 2016; Bozhko, 2014).

Подібні результати при дослідженні спектрів фотонапруги спостерігались і для структур з вмістом $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 12 мол. % ZnIn_2S_4 (рис. 3). При освітленні зі сторони монокристалічної підложки спостерігалось зміщення максимуму фотонапруги до 1,56 еВ, що добре узгоджується зі зростанням ширини забороненої зони $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ із збільшенням вмісту ZnIn_2S_4 (Novosad, 2015).

На рис. 4 представлений спектральний розподіл фотонапруги для однієї зі структур $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 16 мол. % ZnIn_2S_4 . Згідно з даними робіт (Bozhko, 2015; Bozhko, 2016; Bozhko, 2014), кристали твердих розчинів $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 16 мол. % ZnIn_2S_4 виявились двофазними та невідтворюваними. Проте ми вважали за потрібне дослідити і ці структури. Ідентичність спектрів фотонапруги при освітленні зі сторони підложки та металевої плівки може обумовлюватись відсутністю потенціального бар'єра, обумовленого V_{Cu} , які, на нашу думку, майже відсутні у двофазних твердих розчинах.

На рис. 5 представлені результати досліджень спектрів фотонапруги однієї із найкращих структур $\text{In-Ga/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 12 мол. % ZnIn_2S_4 , отриманої втиранням In-Ga евтектики

в поверхню $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$. При освітленні зі сторони напівпровідникової підложки (крива 1) спостерігався вузький максимум з енергетичним положенням 1,44 еВ. На нашу думку, цей максимум обумовлюється переходами з акцепторних рівнів V_{Cu} в зону провідності. Ширина спектра фотонапруги на половині висоти становить 180 меВ.

Крива 2 на рис. 5 відповідає спектральному розподілу фотонапруги при освітленні зі сторони In-Ga евтектики. Поряд з максимумом, обумовленим власними оптичними переходами ($h\nu \approx 1,68$ еВ), в довгохвильовій області спостерігалась менш виражена сходинка, обумовлена домішковим поглинанням світла, відповідальними за яке є V_{Cu} .

Висновки і перспективи подальших досліджень. Показано, що втиранням In-Ga в поверхню монокристалічних плівок $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ та напиленням напівпрозорого шару індію на сколи $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ можна одержати двошарові поверхнево-бар'єрні структури. Поверхнево-бар'єрні структури $\text{In(In-Ga)/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$, отримані запропонованими методами, проявляють фотовольтаїчні властивості. Маючи вузькі максимуми в спектрах фотонапруги, структури In(In-Ga)/

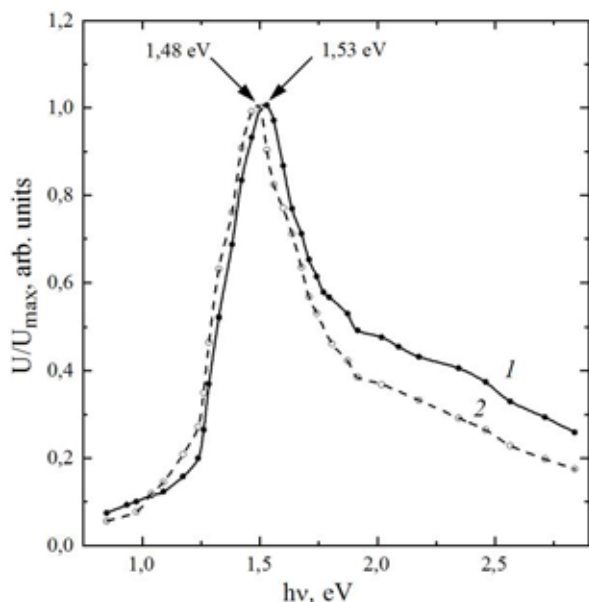


Рис. 4. Спектральний розподіл фотонапруги структури $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 16 мол. % ZnIn_2S_4 : 1 – освітлення зі сторони монокристалічної підложки; 2 – освітлення зі сторони плівки напівпрозорого In

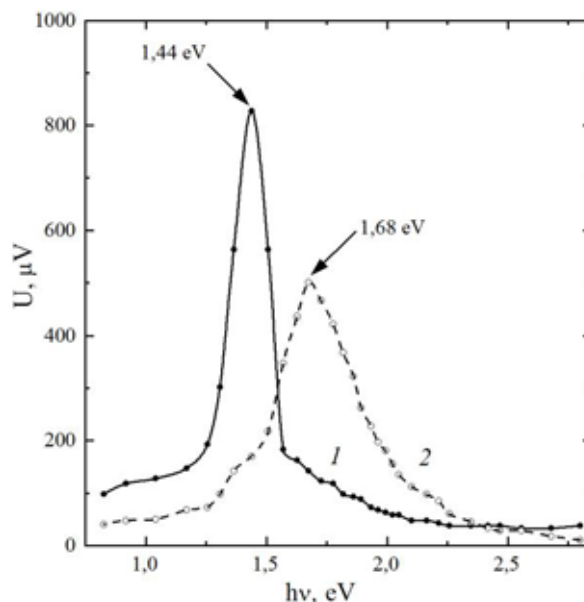


Рис. 5. Спектральний розподіл фотонапруги структури $\text{In-Ga/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 12 мол. % ZnIn_2S_4 : 1 – освітлення зі сторони монокристалічної підложки; 2 – освітлення зі сторони In-Ga евтектики.

$\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ можна використовувати як вузько-космугові приймачі світла. Енергетичне положення максимумів в спектрах фотонапруги залежало від складу монокристалів $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$, від способу одержання двошарової структури

та від сторони структури, яка освітлювалась. Монокристали $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ та поверхнево-бар'єрні структури на їх основі можуть знайти використання при розробці фотоелектроперетворювачів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. Підручник. Київ: Національний технічний університет України «КПІ», 2012. 495 с.
2. Кудря С. О., Будько В. І. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії [Електронний ресурс] : курс лекцій. Київ : НТУУ «КПІ», 2013. 387 с.
3. Klenk R., Klaer J., Scheer R., Lux-Steiner M.Ch., Luck I., Meyer N., Ruhle U. Solar cells based on CuInS_2 – an overview. *Thin Sol. Films*. 2005. Vol. 509, P. 480–481.
4. Meese J.M., Manthuruthil J.K., Locker D.R. CuInS_2 diodes for solar-energy conversion. *Bull. Amer. Phys. Soc.* 1975. Vol. 20. P. 696.
5. Bozhko V.V., Novosad A.V., Parasyuk O.V., Vainorius N., Vertelis V., Nekrošius A., and Kažukauskas V. Enhanced persistent photoconduction in $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ alloys single crystals and processes of its relaxation. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2016. Vol. 627. P. 153–162.
6. Bozhko V.V., Novosad A.V., Parasyuk O.V., Vainorius N., Vertelis V., Nekrošius A., Kažukauskas V. Photoconductivity relaxation processes in $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InS}_2$ solid solutions. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2015. Vol. 39. P. 665–670.
7. Bozhko V.V., Novosad A.V., Parasyuk O.V., Khyzhun O.Y., Vainorius N., Nekrošius A., Vertelis V., Kažukauskas V. Electrical properties and electronic structure of $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InSe}_2$ and $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InS}_2$ single crystals. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2015. Vol. 82. P. 42–49.
8. Новосад О.В., Федосов С.А., Божко В.В. Вольт-амперні характеристики поверхнево-бар'єрних структур $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$. *Наукові нотатки*. 2020. №. 69. С. 63–67.
9. Bozhko V.V., Novosad A.V., Davidyuk G.E., Kozer V.R., Parasyuk O.V., Vainorius N., Sakavicius A., Janonis V., Kažukauskas V. $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ solid solutions: Growth, physical and photo-electrical properties. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2014. Vol. 604, № 1. P. 164–173.
10. Bozhko V.V., Novosad A.V., Davidyuk G.E., Kozer V.R., Parasyuk O.V., Vainorius N., Sakavicius A., Janonis V., Kažukauskas V. Solid-state solutions of copper indium disulfide and zinc indium tetrasulfide: Growth, crystallography and opto-electronic properties. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2014. Vol. 24. P. 231–236.
11. Wagner S. Defect physics of the CuInSe_2 chalcopyrite semiconductor *Top. Appl. Phys.* 1997. Vol. 17. P. 171–176.
12. Novosad O.V., Bozhko V.V., Kityk I.V., Vertelis V., Photoelectrical and piezooptical properties of $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InS}_2$ solid solutions. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. 2015. Vol. 12. P. 53–62.

REFERENCES:

1. Kudria, S.O. (2012). *Netradytsiyni ta vidnovlyuvani dzhерela enerhiyi. Pidruchnyk. [Non-Traditional and Renewable Energy Sources. Textbook]*. Kyiv: National Technical University of Ukraine “KPI”, 2012. 495 s. [in Ukrainian].
2. Kudria, S. O., & Budko, V. I. *Netradytsiyni ta vidnovlyuvani dzhерela enerhiyi [Elektronnyy resurs]: kurs lektsiy [Non-traditional and renewable energy sources [Electronic resource]: course of lectures]*. Kyiv: NTUU “KPI”, 2013. 387 s. [in Ukrainian].
3. Klenk, R., Klaer, J., Scheer, R., Lux-Steiner, M.Ch., Luck, I., Meyer, N., & Ruhle, U. (2005). Solar cells based on CuInS_2 – an overview. *Thin Sol. Films*. Vol. 509, P. 480–481
4. Meese, J.M., Manthuruthil, J.K., & Locker, D.R. (1975). CuInS_2 diodes for solar-energy conversion. *Bull. Amer. Phys. Soc.* Vol. 20. P. 696.
5. Bozhko, V.V., Novosad, A.V., Parasyuk, O.V., Vainorius, N., Vertelis, V., Nekrošius, A., & Kažukauskas, V. (2016). Enhanced persistent photoconduction in $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ alloys single crystals and processes of its relaxation. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. Vol. 627. P. 153–162.
6. Bozhko, V.V., Novosad, A.V., Parasyuk, O.V., Vainorius, N., Vertelis, V., Nekrošius, A., & Kažukauskas, V. (2015). Photoconductivity relaxation processes in $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InS}_2$ solid solutions. *Materials Science in Semiconductor Processing*. Vol. 39. P. 665–670.
7. Bozhko, V.V., Novosad, A.V., Parasyuk, O.V., Khyzhun, O.Y., Vainorius, N., Nekrošius, A., Vertelis, V., & Kažukauskas, V. (2015). Electrical properties and electronic structure of $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InSe}_2$ and $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InS}_2$ single crystals. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. Vol. 82. P. 42–49.

8. Novosad, O.V., Fedosov, S.A., & Bozhko, V.V. (2020). *Vol't-amperni kharakterystyky poverkhnevo-bar'yernykh struktur In/CuInS₂-ZnIn₂S₄*. [Current-voltage characteristics of surface-barrier structures In/CuInS₂-ZnIn₂S₄]. Scientific notes. No. 69. P. 63–67.
9. Bozhko, V.V., Novosad, A.V., Davidiuk, G.E., Kozer, V.R., Parasyuk, O.V., Vainorius, N., Sakavicius, A., Janonis, V., & Kazukauskas, V. (2014). CuInS₂-ZnIn₂S₄ solid solutions: Growth, physical and photo-electrical properties. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. Vol. 604, № 1. P. 164–173.
10. Bozhko, V.V., Novosad, A.V., Davidiuk, G.E., Kozer, V.R., Parasyuk, O.V., Vainorius, N., Sakavičius, A., Janonis, V., & Kazukauskas, V. (2014). Solid-state solutions of copper indium disulfide and zinc indium tetrasulfide: Growth, crystallography and opto-electronic properties. *Materials Science in Semiconductor Processing*. Vol. 24. P. 231–236.
11. Wagner, S. (1997). Defect physics of the CuInSe₂ chalcopyrite semiconductor *Top. Appl. Phys.* Vol. 17. P. 171–176.
12. Novosad, O.V., Bozhko, V.V., Kityk, I.V., Vertelis, V. (2015). Photoelectrical and piezooptical properties of Cu_{1-x}Zn_xInS₂ solid solutions. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. Vol. 12. P. 53–62.

УДК 538.945

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-10>

Павло САХНЮК

аспірант кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-4422-6082>

Оксана ЗАМУРУЄВА

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, Волинська обл., Україна, 43025
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0032-0613>
SCOPUS AUTHOR ID: 56181742100

Бібліографічний опис статті: Сахнюк, П., Замуруєва, О. (2025). Магнітні властивості джозефсонівських контактів з другою гармонікою в струм-фазовій залежності. *Фізика та освітні технології*, 1, 76–82, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-10>

МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ ДЖОЗЕФСОНІВСЬКИХ КОНТАКТІВ З ДРУГОЮ ГАРМОНІКОЮ В СТРУМ-ФАЗОВІЙ ЗАЛЕЖНОСТІ

Проведене дослідження присвячене актуальній проблемі фізики надпровідності, а саме вивченню струмових станів у надпровідних контактах, які демонструють відхилення від стандартної синусоїдної залежності струму від різниці фаз. Ця проблема є предметом інтенсивних наукових досліджень як з фундаментальної точки зору, так і з прикладної, оскільки несинусоїдна залежність може суттєво впливати на характеристики джозефсонівських контактів, що використовуються в різноманітних технологічних застосуваннях.

Основна мета дослідження полягає у встановленні кількісного впливу зовнішнього магнітного поля на струм-фазову залежність та критичний струм таких контактів з урахуванням наявності другої гармоніки.

Виконано аналітичне дослідження впливу параметра ангармонічності α на критичний струм контакту за відсутності зовнішнього магнітного поля. Показано, що зі збільшенням параметра ангармонічності критичний струм зростає, причому ця залежність є квадратичною при малих значеннях α та наближається до лінійної при великих значеннях α .

Одержано залежність критичного струму контакту від величини магнітного потоку та параметра ангармонічності α . Результати дослідження представлені у вигляді графіків залежності повного струму від різниці фаз при різних значеннях магнітного потоку, залежності фази, при якій досягається максимум струму, від магнітного потоку, а також залежності критичного струму від магнітного потоку для різних значень параметра ангармонічності α . Встановлено, що зі збільшенням параметра ангармонічності α критичний струм стає більш чутливим до дії зовнішнього магнітного поля, особливо в області малих значень магнітного потоку. Це проявляється у більш швидкому зменшенні критичного струму зі збільшенням магнітного поля для контактів з ненульовим значенням α порівняно з контактами, що мають чисто синусоїдну струм-фазову залежність.

Ключові слова: надпровідний контакт, струм-фазова залежність, критичний струм, магнітний потік.

Pavlo SAKHNIUK

Postgraduate Student at the A. V. Svidzynsky Department of Theoretical and Computer Physics, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Ukraine, 43025
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-4422-6082>

Oksana ZAMURUEVA

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Theoretical and Computer Physics named by A. V. Svidzynskyi, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Ukraine, 43025
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0032-0613>
SCOPUS AUTHOR ID: 56181742100

To cite this article: Sakhniuk, P., Zamuruieva, O. (2025). Mahnitni vlastyivosti dzhozefsonivskykh kontaktiv z druhoiu harmonikoiu v strum-fazovii zalezhnosti [Magnetic properties of Josephson junctions with a second harmonic in the current-phase relationship]. *Physics and Educational Technology*, 1, 76–82, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-10>

MAGNETIC PROPERTIES OF JOSEPHSON JUNCTIONS WITH A SECOND HARMONIC IN THE CURRENT-PHASE RELATIONSHIP

The conducted research is devoted to a relevant problem in superconductivity physics, namely the study of current states in superconducting junctions that exhibit deviations from the standard sinusoidal current-phase relationship. This problem is a subject of intensive scientific research from both fundamental and applied perspectives, as the non-sinusoidal dependence can significantly affect the characteristics of Josephson junctions used in various technological applications.

The main goal of the research is to establish the quantitative impact of an external magnetic field on the current-phase relationship and critical current of such junctions, considering the presence of a second harmonic.

An analytical study of the influence of the anharmonicity parameter α on the critical current of the junction in the absence of an external magnetic field was performed. It was shown that with an increase in the anharmonicity parameter, the critical current increases, and this dependence is quadratic at small values of α and approaches linear at large values.

The dependence of the junction's critical current on the magnetic flux magnitude and the anharmonicity parameter α was obtained. The research results are presented as graphs of the total current versus the phase difference at different magnetic flux values, the phase at which the current maximum is achieved versus the magnetic flux, and the critical current versus the magnetic flux for different values of the anharmonicity parameter α . It was established that with an increase in the anharmonicity parameter α , the critical current becomes more sensitive to the action of an external magnetic field, especially in the region of small magnetic flux values. This manifests as a faster decrease in the critical current with an increase in the magnetic field for junctions with a non-zero value of α compared to junctions with a purely sinusoidal current-phase relationship.

Key words: superconducting junction, current-phase relation, critical current, magnetic flux.

Вступ. Дослідження струмових станів у надпровідних контактах різного типу невпинно розвиваються та набувають дедалі більшого інтересу як у фундаментальному аспекті так і з боку інженерії у практичній площині (див. огляд (Golubov, 2004, р. 411)). Ключовим питанням теоретичних досліджень фізики надпровідних контактів є залежність струму від різниці фаз. Існує ціла низка факторів, що суттєво впливають на форму цієї залежності. У багатьох випадках врахування цих факторів приводить до відхилення струм-фазової залежності від простої синусоїдної (Sakhniuk, 2017; Сахнюк, 2011).

Якщо вважати коефіцієнт проходження електронів малим, як це припускається в багатьох дослідженнях (Golubov, 2004, р. 411), то величина надпровідного струму, що протікає через контакт буде малою. Ця обставина дозволяє знехтувати впливом струму на просторову поведінку параметра впорядкування і відкинути доданком з надплинною швидкістю у рівнянні Гінзбурга-Ландау (Свідзинський, 2011), якщо говорити про надпровідні контакти для температур, близьких до критичної. При дослідженні струм-фазової залежності без додаткових умов на коефіцієнт проходження електронів

необхідно враховувати ефекти розпаровування, оскільки для малих значень коефіцієнта прозорості величина струму наближається до термодинамічного критичного. Врахування ефекту розпаровування полягає у збереженні доданку з надплинною швидкістю у рівнянні Гінзбурга-Ландау, що зрештою відобразиться на формі залежності струму від різниці фаз та інших важливих, як в фундаментальному, так і прикладному аспектах, характеристиках надпровідних контактів. Для певного інтервалу зміни значень коефіцієнта проходження електронів це приводитиме до появи додаткового доданка із синусом подвоєної фази, кажуть з'являється друга гармоніка. Якщо ж коефіцієнт проходження електронів наближається до одиниці, то струм-фазова залежність стає ще складнішою.

Поблизу границі, внаслідок умови самоузгодженості, параметр впорядкування менший ніж в глибині надпровідника. В результаті, із збільшенням струму, ефекти розпаровування проявляються суттєвіше саме в цій області.

Мета роботи. Дослідження впливу магнітного поля на залежність струму від різниці фаз та критичний струм в тунельних

джозефсонівських контактах з другою гармонікою в струм-фазовій залежності.

Модель та основні рівняння. В роботі досліджуються тунельні надпровідні контакти, утворені двома надпровідниками розділеними тонким прошарком діелектрика. Анггармонічність струм-фазової залежності в таких контактах на основі високотемпературних надпровідників та надпровідників на основі заліза пов'язана з d-хвильовою поведінкою параметра впорядкування (Tsuei, 2000). У контактах на основі звичайних низькотемпературних надпровідників при температурах, близьких до критичної, анггармонічність з'являється зі збільшенням коефіцієнта проходження електронів (Sakhnyuk, 2017; Сахнюк, 2011).

В нашому дослідженні розглядається анггармонічність в найпростішому вигляді, що математично виражається у включенні доданку з другою гармонікою в формулу для залежності струму від різниці фаз (Tsuei, 2000)

$$j(\varphi) = j_{co}(\sin\varphi + \alpha \sin 2\varphi), \quad (1)$$

де j_{co} – критичний струм контакту за відсутності другої гармоніки. Параметр анггармонічності α залежить від технології підготовки контакту.

Знайдемо критичний струм контакту при даній струм-фазовій залежності. Диференціюючи (1) по φ одержимо:

$$\frac{dj(\varphi)}{d\varphi} = j_{co}(\cos\varphi + 2\alpha \cos 2\varphi) = 0,$$

або

$$4\alpha \cos^2\varphi + \cos\varphi - 2\alpha = 0.$$

Розв'язуючи останнє рівняння знайдемо різницю фаз, при якій густина струму в контакті досягає максимального значення:

$$\cos\varphi_c = \frac{-1 + \sqrt{1 + 32\alpha^2}}{8\alpha}. \quad (2)$$

Підставляючи (2) в (1) знаходимо критичний струм контакту, як функцію параметра анггармонічності α :

$$j_c(\alpha) = j_{co} \frac{1}{32\alpha} \sqrt{(\sqrt{1 + 32\alpha^2} + 1)^2 - 4(3 + \sqrt{1 + 32\alpha^2})}. \quad (3)$$

На Рис. 1 побудовано графік, який відображає вплив параметра анггармонічності α в струм-фазовій залежності на критичний струм контакту. Як видно зі збільшенням α критичний

струм зростає і досить швидко апроксимується лінійною залежністю. Те, що зі збільшенням α залежність критичного струму від параметра α наближається до лінійної можна також переко-
нати і безпосередньо на основі формули (3), асимптотой графіка якої є функція

$$j_c^{as}(\alpha) = j_{co} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \alpha \right).$$

Для асимптотичного випадку $\alpha \rightarrow 0$ одержуємо

$$j_c(0) = j_{co}(1 + 2\alpha^2),$$

тобто залежність від параметра анггармонічності є квадратичною.

Знайдемо явний вигляд параметра анггармонічності у формулі (1) для тунельного джозефсонівського контакту SIS при температурах, близьких до критичної. Для цього скористаємося формулою для залежності струму від різниці фаз в таких контактах з врахуванням ефектів розпаровування (Sakhnyuk, 2017; Сахнюк, 2011)

$$I_s = I_c \sqrt{1 - \varepsilon^2} \frac{\sin\varphi}{1 - \varepsilon \cos\varphi}. \quad (4)$$

Тут ε – безрозмірний параметр:

$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{1 + 2\tau^2 q_\infty^2}}$, в якому $\tau = \sqrt{\frac{12}{7\zeta(3)}} \left(1 - \frac{T}{T_c} \right)$, $\zeta(3)$ – зета функція Рімана, T – температура, T_c – критична температура, I_c – критичний струм контакту;

$$q_\infty = \frac{\pi^4}{56\zeta(3)} \left(\frac{1}{D} - 1 \right) \left[1 + \frac{1-D}{D} \ln(1-D) \right] + \frac{42\zeta(3)}{\pi^2} \left(\frac{1}{D} - 1 \right)^3 \times \frac{\left\{ \sqrt{\frac{D}{1-D}} - \arctan \sqrt{\frac{D}{1-D}} \right\}^2}{1 + \frac{1-D}{D} \ln(1-D)},$$

D – коефіцієнт проходження електронів крізь контакт.

Для малих ε у формулі (4) можна виконати розклад в ряд Тейлора. Тоді, зберігаючи доданки не вище першого степеня ε , одержимо

$$I_s \approx \sin\varphi + \frac{\varepsilon}{2} \sin 2\varphi.$$

Параметр ε є малим при малих значеннях коефіцієнта проходження електронів. Графік залежності ε від коефіцієнта проходження електронів D подано на Рис. 1 в (Shutovskiy,

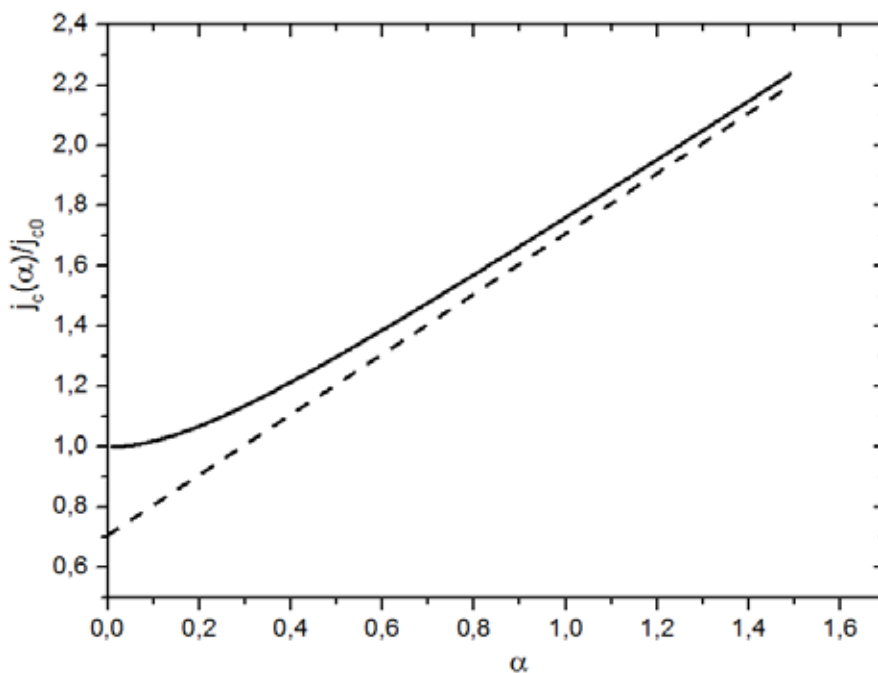


Рис. 1. Залежність густини критичного струму контакту від параметра α .

Пунктирна пряма є асимптотою $\frac{j_c^{as}(\alpha)}{j_{c0}} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \alpha \right)$

2022). Для коефіцієнта проходження електронів $D=0,053$ та температури $T=0,98T_c$ маємо $\varepsilon=0,2$.

Вплив магнітного поля на протікання струму в надпровідних контактах з другою гармонікою в струм-фазовій залежності

З'ясуємо, як наявність другої гармоніки відобразиться на поведінці джозефсонівського контакту в магнітному полі та одержимо залежність критичного струму від величини потоку магнітного поля, яке пронизує надпровідний контакт.

Вважатимемо, що зовнішнє магнітне поле прикладене паралельно до площини контакту, а систему координат виберемо так, щоб вектор напруженості магнітного поля збігався за напрямом з віссю $Oy: \vec{H} = (0, H, 0)$. Струм протікає вздовж осі $Oz: \vec{j} = (0, 0, j)$.

У випадку геометрії контакту, зображеного на Рис. 1 різниця фаз залежатиме від координати x (Сахнюк, 2013):

$$\varphi \rightarrow 2edHx + \varphi, \quad (5)$$

де e – заряд електрона, d – товщина області навколо прошарку діелектрика, в яку проникає магнітне поле.

Підставляючи (5) у вираз для густини струму (1) одержимо залежність густини струму від координати вздовж контакту

$$j(H, x, \varphi) = j_{c0} [\sin(2edHx + \varphi) + \alpha \sin(4edHx + 2\varphi)].$$

Для знаходження повного струму, що протікає через контакт необхідно проінтегрувати останню формулу по площі контакту

$$I(H, \varphi) = \int_0^l dx \int_0^1 dy j_{c0} [\sin(2edHx + \varphi) + \alpha \sin(4edHx + 2\varphi)] =$$

$$= j_{c0} \left[\frac{\sin(edHl) \cdot \sin(edHl + \varphi)}{edH} + \alpha \frac{\sin(2edHl) \cdot \sin(2edHl + 2\varphi)}{2edH} \right]. \quad (6)$$

Використовуючи позначення для повного потоку магнітного поля через контакт $\Phi = Hld$

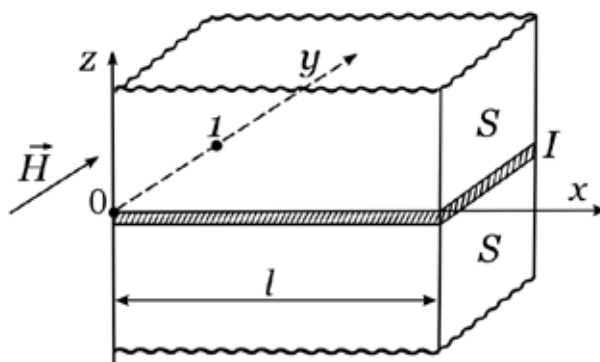


Рис. 2. Схематичне зображення досліджуваного в роботі джозефсонівського тунельного надпровідного контакту (Сахнюк, 2013)

та критичного струму за відсутності магнітного поля $I_{co} = j_{co} l$ після виконання інтегрування в (6) одержимо

$$I(H, \varphi) = I_{co} \frac{\sin\left(\frac{\pi\Phi}{\Phi_0}\right)}{\frac{\pi\Phi}{\Phi_0}} \left[\sin\left(\frac{\pi\Phi}{\Phi_0} + \varphi\right) + \alpha \cos\left(\frac{\pi\Phi}{\Phi_0}\right) \sin\left(\frac{2\pi\Phi}{\Phi_0} + 2\varphi\right) \right]. \quad (7)$$

Залежність струму, що протікає через контакт від різниці фаз при різних значеннях магнітного потоку в інтервалі від нуля до значень близьких кванту магнітного потоку зображено на Рис. 3. Зі збільшенням величини магнітного потоку амплітуда струму зменшується, а різниця фаз, при якій струм досягає максимуму зміщується в напрямку нуля.

Для знаходження критичного струму контакту, як функції магнітного потоку необхідно обчислити від (7) похідну по φ . Далі, покладаючи одержану похідну рівною нулеві, знайти значення різниці фаз, при якому струм в контакті досягає максимуму.

Обчислюючи від (7) похідну по φ та прирівнюючи її до нуля одержимо

$$4\alpha \cos\left(\frac{\pi\Phi}{\Phi_0}\right) \cos^2\left(\frac{\pi\Phi}{\Phi_0} + \varphi_c\right) + \cos\left(\frac{\pi\Phi}{\Phi_0} + \varphi_c\right) - 2\alpha \cos\left(\frac{\pi\Phi}{\Phi_0}\right) = 0.$$

Розв'язок цього рівняння:

$$\cos\left(\frac{\pi\Phi}{\Phi_0} + \varphi_c\right) = \frac{-1 + \sqrt{1 + 32\alpha^2 \cos^2\left(\frac{\pi\Phi}{\Phi_0}\right)}}{8\alpha \cos\left(\frac{\pi\Phi}{\Phi_0}\right)}. \quad (8)$$

Підставляючи (8) в (7) одержимо залежність критичного струму контакту від магнітного потоку:

$$I_c(\Phi) = I_{co} \frac{3 + \sqrt{1 + 32\alpha^2 \cos^2\left(\frac{\pi\Phi}{\Phi_0}\right)}}{32\alpha \cos\left(\frac{\pi\Phi}{\Phi_0}\right)} \left[\sqrt{1 + 32\alpha^2 \cos^2\left(\frac{\pi\Phi}{\Phi_0}\right)} + 1 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Розглядаючи в останньому результаті асимптотичний випадок $\alpha \rightarrow 0$, що означатиме відкрити у виразі для струму доданок, пов'язаний з ангармонічністю, легко відтворимо формулу залежності критичного струму від магнітного потоку для синусоїдної залежності струму від різниці фаз (Свідзинський, 2011).

За відсутності магнітного поля максимум струму в контакті досягається при різниці фаз $\varphi_c \approx 1,1 \text{ рад}$, зі збільшенням магнітного потоку φ_c зменшується за близьким до лінійного законом, однак при наближенні до половини кванту магнітного потоку ця залежність ускладнюється, а зменшення фази сповільнюється.

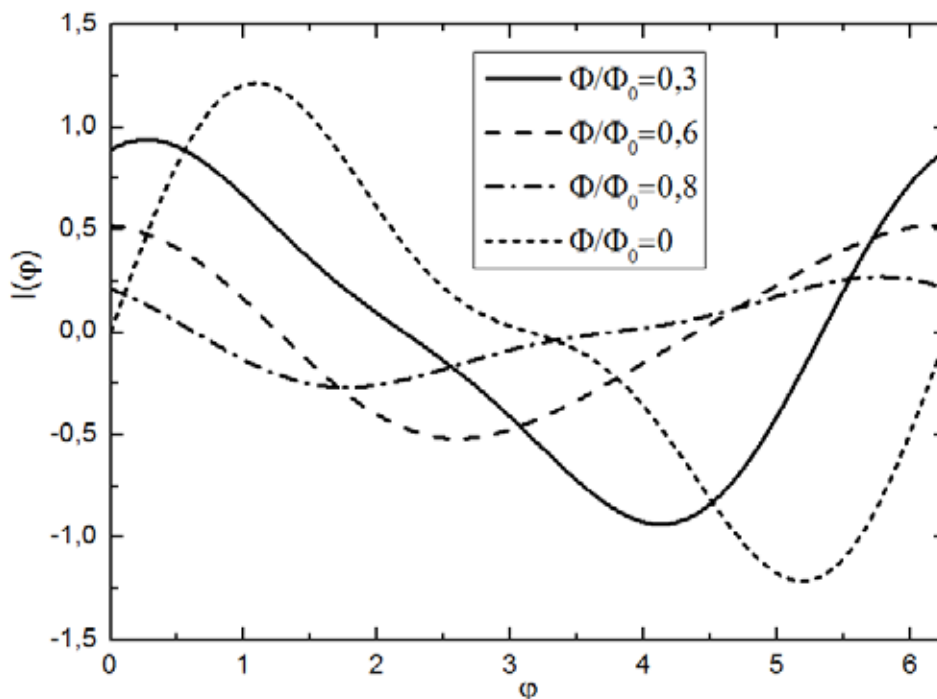


Рис. 3. Залежність повного струму через контакт від різниці фаз при різних значеннях потоку магнітного поля

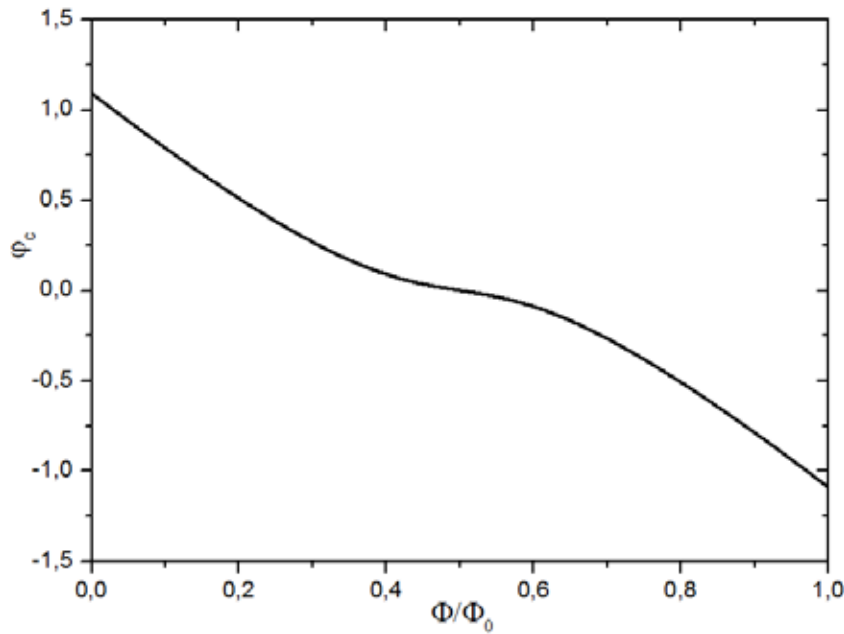


Рис. 4. Залежність значення різниці фаз, при якому струм в контакті досягає максимуму, від потоку магнітного поля

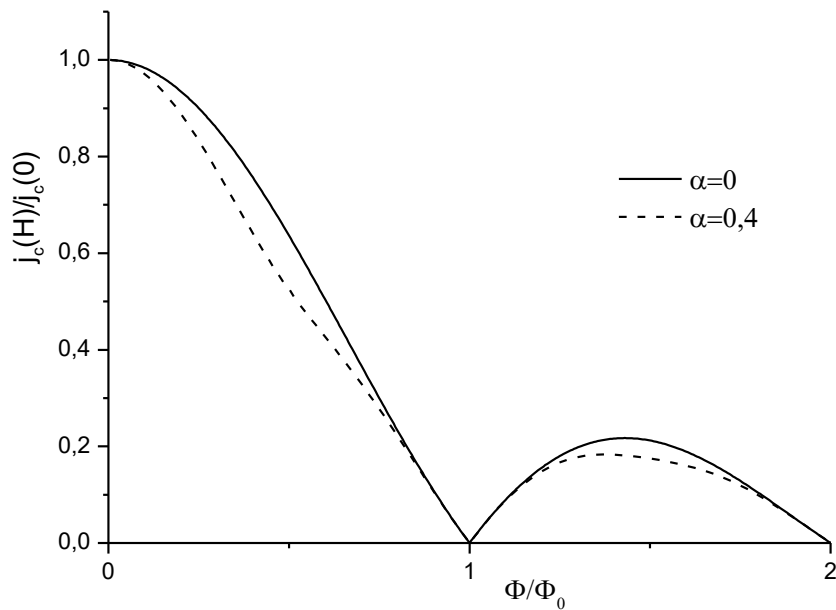


Рис. 5. Залежність критичного струму контакту від магнітного потоку. Суцільна лінія для синусоїдної залежності, пунктирна для ангармонійної (1)

З графіків, зображених на Рис. 5, можемо зробити висновок щодо впливу ангармонійності на залежність критичного струму контакту від магнітного потоку: зі збільшенням параметра α критичний струм є більш чутливим до появи зовнішнього магнітного поля. Особливо це добре видно в околі нуля: зі збільшенням магнітного потоку критичний струм швидше зменшується для випадку відмінного

від нуля α . Ця обставина є корисною в плані практичного використання таких контактів у детекторах магнітних полів.

Висновки. Встановлено, що наявність другої гармоніки, яка характеризується параметром α , призводить до збільшення критичного струму контакту. Ця залежність є квадратичною при малих значеннях α та наближається до лінійної при великих значеннях. Отримано

аналітичні вирази для критичного струму як функції параметра ангармонічності, що дозволяє кількісно оцінити цей вплив.

Досліджено вплив зовнішнього магнітного поля, прикладеного паралельно площині контакту, на струмові характеристики. Отримано вираз для повного струму через контакт як функції різниці фаз та магнітного потоку. Ключовим результатом є виявлення підвищеної чутливості критичного струму до зовнішнього магнітного поля зі збільшенням параметра ангармонічності α . Особливо це проявляється в області малих

значень магнітного потоку, де критичний струм зменшується швидше для контактів з ненульовим α порівняно з контактами з чисто синусоїдною струм-фазовою залежністю.

Таким чином, проведене дослідження розширює розуміння поведінки джозефсонівських контактів з несинусоїдною струм-фазовою залежністю в магнітному полі. Отримані результати мають важливе значення як для фундаментальної фізики надпровідності, так і для розвитку прикладних надпровідних пристроїв, зокрема чутливих магнітних сенсорів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Golubov A.A., Kupriyanov M. Yu., Il'ichev E. The current-phase relation in Josephson junctions. *Rev. Mod. Phys.* 2004. Vol. 6, p. 411. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.76.411>.
2. Sakhnyuk V. E., Pastukh O. Yu., Shutowskii A. M. The effects of depairing on the current-phase relation in SIS junctions in the presence of nonmagnetic impurities of arbitrary concentration. *Low Temperature Physics*. 2017. Vol. 43. № 6. P. 664-669. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4985972>.
3. Сахнюк В. Є., Головій В. М. Вплив прозорості діелектричного прошарку на форму залежності струму від різниці фаз у контактах типу SIS. *Журнал фізичних досліджень*, 2011, Т. 15, Ч. 2, С. 2702–8. DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.15.2702>.
4. Свідзинський А.В. Мікроскопічна теорія надпровідності : монографія. Луцьк : Волин. нац ун-т ім. Лесі Українки, 2011. 420 с.
5. Tsuei C.C., Kirtley J.R. Pairing symmetry in cuprate superconductors. *Review of Modern Physics*. 2000. 72. P. 969. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.72.969>.
6. Shutovskiy A., Sakhnyuk V., and Zolotaryuk Y. Fluxon dynamics in long Josephson junctions with nontrivial current-phase relation. *Eur. Phys. J.* 2022. B 95, P. 134. DOI: <https://doi.org/10.1140/epjb/s10051-022-00397-8>.
7. Сахнюк В.Є. Дослідження впливу зовнішнього магнітного поля на критичний струм джозефсонівських контактів для температур, близьких до критичної. *Науковий вісник СХУ імені Лесі Українки. Фізичні науки*. Луцьк, 2013. № 26 (275). С. 50–54.

REFERENCES:

1. Golubov, A.A., Kupriyanov, M. Yu., & Il'ichev, E. (2004). The current-phase relation in Josephson junctions. *Rev. Mod. Phys.* 6, p. 411. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.76.411>.
2. Sakhnyuk, V. E., Pastukh, O. Yu., & Shutowskii A. M. (2017). The effects of depairing on the current-phase relation in SIS junctions in the presence of nonmagnetic impurities of arbitrary concentration. *Low Temperature Physics*. 43(6). 664–669. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4985972>.
3. Sakhnyuk, V. E., & Holoviy, V.M. (2011). Vplyv prozorosti diielektrychnoho prosharku na formu zalezhnosti strumu vid riznytsi faz u kontaktakh typu SIS [Influence of dielectric barrier transparency on the current-phase relationship in SIS junctions]. *Zhurnal fizychnykh doslidzhen'*, 15(2), 2702(8pp). DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.15.2702>.
4. Svidzynskiy, A.V. (2011). Mikroskopichna teoriia nadprovidnosti [Microscopic theory of superconductivity]: monohrafiia. Luts'k : Volyn. nats un-t im. Lesi Ukrainky, 420 s. [in Ukrainian].
5. Tsuei, C.C., & Kirtley, J.R. (2000). Pairing symmetry in cuprate superconductors. *Review of Modern Physics*. 72. P. 969. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.72.969>.
6. Shutovskiy, A., Sakhnyuk, V., & Zolotaryuk, Y. (2022). Fluxon dynamics in long Josephson junctions with nontrivial current-phase relation. *Eur. Phys. J. B* 95. P.134. DOI: <https://doi.org/10.1140/epjb/s10051-022-00397-8>.
7. Sakhniuk, V.E. (2013). Doslidzhennia vplyvu zovnishnoho mahnitnoho polia na krytychnyi strum yozefsonivskykh kontaktiv dlia temperatur, blyzkykh do krytychnoi [A study of the influence of an external magnetic field on the critical current in Josephson junctions for temperatures near the critical temperature]. *Naukovyi visnyk SNU imeni Lesi Ukrainky. Fizychni nauky*. Lutsk, 26(275), 50–54.

УДК 37.015.3:159.953]-043.86]:78.08-043.2](045)

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-11>

Любов СОБОЛЕНКО

кандидат біологічних наук, доцент кафедри біології та здоров'я людини, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, вул. Садова 2, м. Умань, Черкаська область, Україна, 20300

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1196-4772>

Світлана СОРОКІНА

кандидат біологічних наук, доцент кафедри біології та здоров'я людини, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, вул. Садова 2, м. Умань, Черкаська область, Україна, 20300

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8155-001X>

Вікторія СТОЛЯР

вчитель біології та екології, Уманський ліцей № 3 Уманської міської ради Черкаської області, вул. Михайла Драгоманова 26, м. Умань, Черкаська область, Україна, 20300

Бібліографічний опис статті: Соболенко, Л., Сорокіна, С., Столяр, В. (2025). Розвиток когнітивних здібностей здобувачів освіти під впливом різних жанрів музики. *Фізика та освітні технології*, 1, 83–91, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-11>

РОЗВИТОК КОГНІТИВНИХ ЗДІБНОСТЕЙ ЗДОБУВАЧІВ ОСВІТИ ПІД ВПЛИВОМ РІЗНИХ ЖАНРІВ МУЗИКИ

Основними когнітивними функціями мозку є сприйняття, пам'ять, мислення та увага. На первинному етапі сприйняття переважає І сигнальна система, тобто відчуття звукових, світлових, хімічних та інших подразників нашими аналізаторами на основі безумовного орієнтувального рефлексу. З точки зору фізіології нервової діяльності увага є процесом свідомого зосередження на актуальній інформації, ініціація механізмів запам'ятовування і руху, утворення нових зв'язків між збудженими нейронами. З погляду психології увага є фактором, який здійснює вибірковість сприйняття. Фізіологічною основою зосередження є активація визначених центрів кори головного мозку. Вибірковість є визначальною закономірністю уваги.

Тому метою дослідження є вивчення музичних вподобань підлітків і визначення впливу різних жанрів музики на розвиток властивостей уваги старшокласників.

У житті сучасних підлітків і молоді важливим засобом комунікації та впливу на емоційний стан особистості є музична культура. Сучасні дослідження свідчать, що вдало підібрана композиція здатна як активізувати, так і гальмувати засвоєння інформації.

У даній статті представлено детальні результати досліджень, які стосуються впливу різних жанрів музики на розвиток когнітивних функцій мозку.

У результаті дослідження експериментально доведено позитивний вплив різних жанрів музики, а саме: популярної (поп), року, електронної, класичної на динаміку параметрів уваги здобувачів освіти.

Здійснений аналіз впливу музики, як чинника, дозволяє стверджувати, що вона, в цілому підвищує ефективність когнітивних функцій мозку старшокласників, зокрема такі властивості уваги, як концентрація, обсяг, переключення. Врахування адміністрацією освітніх закладів музичних вподобань, відображених у вигляді авторського музичного плейлиста «Слухай і Вчись» та досліджених закономірностей сприятиме організації комфортних умов навчання та відпочинку, а також розробці інноваційних методик підвищення ефективності сприйняття навчального матеріалу.

Ключові слова: когнітивні функції мозку, жанри музики, здобувачі освіти, концентрація уваги, обсяг уваги, переключення уваги.

Liubov SOBOLENKO

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor at the Department of Biology and Human Health, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, 2 Sadova str., Uman, Cherkasy region, Ukraine, 20300

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1196-4772>

Svitlana SOROKINA

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor at the Department of Biology and Human Health, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, 2 Sadova str., Uman, Cherkasy region, Ukraine, 20300

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8155-001X>

Victoria STOLYAR

Teacher of Biology and Ecology, Uman Lyceum No. 3, Uman City Council, 26 Mykhaila Drahomanova str., Uman, Cherkasy region, Ukraine, 20300

To cite this article: Sobolenko, L., Sorokina, S., Stolyar, V. (2025). Rozvytok kohnityvnykh zdibnostei zdobuvachiv osvity pid vplyvom riznykh zhanriv muzyky [Development of cognitive abilities of students under the influence of different genres of music]. *Physics and Educational Technology*, 1, 83–91, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-11>

DEVELOPMENT OF COGNITIVE ABILITIES OF STUDENTS UNDER THE INFLUENCE OF DIFFERENT GENRES OF MUSIC

The main cognitive functions of the brain are perception, memory, thinking and attention. At the initial stage of perception, the first signaling system prevails, i.e., the sensation of sound, light, chemical and other stimuli by our analyzers on the basis of an unconditional orienting reflex. From the point of view of the physiology of nervous activity, attention is a process of consciously focusing on relevant information, initiating mechanisms of memorization and movement, and forming new connections between excited neurons. From the psychological point of view, attention is a factor that determines the selectivity of perception. The physiological basis of concentration is the activation of certain cortical centers. Selectivity is a defining feature of attention.

Therefore, the purpose of the study is to investigate the musical preferences of adolescents and to determine the influence of different genres of music on the development of high school students' attention.

In the life of modern adolescents and young people, music culture is an important means of communication and influence on the emotional state of a person. Modern research shows that a well-chosen composition can both activate and inhibit the assimilation of information.

This article presents detailed results of research on the impact of different genres of music on the development of cognitive functions of the brain.

The study experimentally proved the positive influence of different genres of music, namely: popular (pop), rock, electronic, classical on the dynamics of students' attention parameters.

The analysis of the influence of music as a factor suggests that it generally increases the effectiveness of the cognitive functions of the brain of high school students, in particular such properties of attention as concentration, volume, and switching. Taking into account the musical preferences of the administration of educational institutions, reflected in the form of the author's music playlist "Listen and Learn" and the studied patterns, will help to organize comfortable learning and recreation conditions, as well as develop innovative methods to improve the efficiency of perception of educational material.

Key words: *cognitive functions of the brain, music genres, students, concentration, attention span, attention span, attention switching.*

Постановка проблеми та її актуальність.

Основними когнітивними функціями мозку є сприйняття, пам'ять, мислення та увага. На первинному етапі сприйняття переважає І сигнальна система, тобто відчуття звукових, світлових, хімічних та інших подразників нашими аналізаторами на основі безумовного орієнтувального рефлексу. Використання мови є наступним, складнішим етапом пізнання, для якого необхідна не лише активізація центрів кори головного мозку, а й постійна підтримка активності, як такої. З точки зору фізіології нервової діяльності увага – це процес свідомого зосередження на актуальній інформації,

по суті, це – ініціація механізмів запам'ятовування і руху – утворення нових зв'язків між збудженими нейронами. З погляду психології увага – це фактор, який здійснює вибірковість сприйняття. Тому вивченню властивостей уваги надається особливе значення вітчизняними та зарубіжними вченими-фізіологами та психологами (Скрипченко О.В., Долинська Л.В., Огороднійчук З.В. та ін., 2001; Шевчик Р.В., 2015, с. 288-292.).

У житті сучасних підлітків і молоді важливим засобом комунікації та впливу на емоційний стан особистості є музична культура. Сучасні дослідження свідчать, що вдало

підібрана композиція здатна як активізувати, так і гальмувати засвоєння інформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними когнітивними функціями мозку є сприйняття, пам'ять, мислення, увага. На первинному етапі сприйняття переважає І сигнальна система, тобто відчуття звукових, світлових, хімічних та інших подразників нашими аналізаторами на основі безумовного орієнтувального рефлексу. Використання мови є наступним, складнішим етапом пізнання, для якого необхідна не лише активізація центрів кори головного мозку, а й постійна підтримка активності, як такої. З точки зору фізіології нервової діяльності, увага – це процес свідомого зосередження на актуальній інформації, по суті, це – ініціація механізмів запам'ятовування і руху – утворення нових зв'язків між збудженими нейронами. З погляду психології увага – це фактор, який здійснює вибірковість сприйняття. Тому вивченню властивостей уваги надається особливе значення вітчизняними та зарубіжними вченими – фізіологами та психологами (Москальова А.С., Москальов М.В., 2014; Шевчик Р.В., 2015, с. 288-292; Bonneville-Roussy A., Rentfrow P. J., Xu M. K., Potter J., 2013, р. 703–717; Chamorro-Premuzic T., Fagan P., Furnham A., 2010; Thomas Schäfer, Claudia Mehlhorn, 2017, р. 265-273).

Фізіологічною основою зосередження є активація визначених центрів кори головного мозку. Вибірковість є визначальною закономірністю уваги. Останні дослідження електричної активності головного мозку за допомогою Neurofeedback (Nfb) (реєстрація електричних сигналів електроенцефалографом) показали зростання електричного потенціалу в лобно-тім'яних долях під час ускладнення поставлених задач і одночасно активізацію центрів лобної долі кори, які відповідають за пригнічення другорядних функцій (Gaspar J.M., McDonald J.J., 2014). Однак конкретний механізм, за допомогою якого здійснюється контроль попередження відволікаючих стимулів залишається недостатньо вивченим (Hameroff S., Penrose R., 2014, р.104-112). З розвитком квантової фізики у нейрофізіології з'являється все більше прибічників теорії квантової свідомості Хамерофа-Пенроуза або Orch-OR (Orchestrated Objective Reduction). Автори теорії – Stuart Hameroff та Roger Penrose визначили,

що причиною будь-якої когнітивної активності є організована послідовність квантових процесів у колоніях «microtubules» в середині нейронів кори головного мозку і як наслідок – збудження синапсів (Kabat-Zinn J., 2025).

Слід розрізняти поняття уваги та уважності, за якої зосередженість підтримується зусиллями волі, тобто свідомо. За регуляцією виділяють мимовільну, довільну та післядовільну увагу. Усвідомлення мети діяльності, особистий інтерес, потреби і воля характеризують довільну увагу, яка може перетворитись у післядовільну, якщо людина звикає долати труднощі і її захоплює сам процес боротьби (Marcelo Bigliassi, Costas I. Karageorghis, Daniel T. Bishop, Alexander V. Nowicky, Michael J. Wright, 2018, р. 131-139).

Змішаний і дистанційний формати освіти у старшій школі зобов'язують учнів формувати навички самостійної, дослідницької і пошукової роботи з різними джерелами. Такі властивості, як концентрація, стійкість, обсяг і розподіл уваги мають індивідуальний характер, змінюються в процесі навчання та сприяють підвищенню швидкості запам'ятовування і мислення. Закономірно, що зростання інформаційного навантаження стимулює розвиток такої властивості уваги, як обсяг. Робота над проектами вимагає повного занурення та максимальної концентрації на об'єкті дослідження. Вміння розподіляти і перемикаєти увагу допомагає одночасно слухати лекцію, слідкувати за презентаційними матеріалами, конспектувати та спілкуватися в чатах. Звичайно, в таких умовах важко тривалий час зберігати стійкість і зосередженість на чомусь одному. Саме тому «кліпове мислення» одночасно є перевагою і недоліком «покоління Z».

Отже, саме увага спрямовує наше сприйняття до вибору певного виду діяльності, впливає на швидкість запам'ятовування та мислення в цілому.

Підлітковий вік характеризується складними процесами: фізіологічними, психічними та соціального становлення особистості. Основоположник фізіології вищої нервової діяльності І. Павлов відзначив залежність психічних процесів від типу нервової системи та врівноваженості процесів збудження і гальмування. Вітчизняна школа психології, започаткована вченими Запорожцем О.В., Костюком Г.Е., Сікорським Г.О.,

Скрипченком О.В., чимало робіт присвятила дослідженню залежності розвитку окремих видів і властивостей уваги від різних етапів дитинства та підліткового віку (Єльчанінова Т.М., 2011; Котова О. В., Суханова Г. П., 2014, с. 252-257; Савченко Т.Л., 2019, с. 19-208). За визначенням ВООЗ, це період росту та розвитку, який слідує за дитинством і триває до зрілого віку, тобто з 10 до 19 років. У цей час дитина не лише стрімко росте, але й дорослішає – формується свідомість, зростає потреба у визнанні, з'являються нові мотивації, критичне ставлення до себе і до оточення. Інтенсивна навчальна діяльність вимагає розвитку когнітивних функцій – швидкості сприйняття, мислення, пам'яті, уяви. Адже стрімко зростає кількість предметів, навчального контенту, вчителів, вимог. Відповідно зростає необхідність концентруватися на виконанні завдань, незалежно від уподобань. Більш стійкою стає довільна увага, яку учень може спрямовувати на досягнення поставленої мети. В підлітковому віці дитина має достатньо знань і здатна зосереджуватись на абстрактних образах, візуалізувати для себе новий термін чи поняття.

Однак у цей період ще не досить стійкою є емоційно-вольова сфера, що проявляється у швидкій зміні настрою, чергуванні періодів глибокої зацікавленості та байдужості, іноді навіть агресії. Ставлення до навчання вибірково залежить від багатьох факторів: гормонального фону, відносин з батьками чи однокласниками, авторитету вчителя. Дитина починає вчитися контролювати себе, що вимагає від неї величезних вольових зусиль і не завжди спрацьовує, тому «неуважність» часто стає причиною низької якості знань.

Величезне значення для подолання згаданих проблем має педагогічна майстерність учителя, його розуміння вікових особливостей дитини. Важливо підтримувати інтерес до предмету, використовувати різні методи активного навчання, дати можливість дитині відчувати себе вагомим співучасником процесу пізнання. Головним стимулом для виховання в себе стійкої уваги є власний поступ вперед, особливо визнаний оточуючими. Визнання, відповідальність, обов'язок, система доручень у колективі в позаурочний час теж сприяють розвитку уваги підлітків (Єльчанінова Т.М., 2011; Шевчик Р.В., 2015, с. 288-292).

За літературними даними (Савченко Т.Л., 2019, с. 19-208) увага випускників загальноосвітніх закладів нижча, ніж здобувачів вищої освіти II-III курсів, але вища, ніж у абітурієнтів та першокурсників, що зумовлено періодом їх адаптації до умов закладів вищої освіти.

Отже, підлітки 15-17 років у порівнянні із здобувачами молодшої та середньої школи мають більш розвинені параметри уваги: значний обсяг, здатність до тривалої концентрації, раціонального розподілу та переключення, пов'язані з поступовим вдосконаленням механізмів переробки інформації. Відмінності зумовлені фізіологічним, психічним та розвитком емоційно-вольової сфери, а також зростанням потреб обробляти великі обсяги інформації. Загалом випускники гімназій і ліцеїв відрізняються значним адаптивним потенціалом когнітивних процесів, мотивацією, що сприяє кращому засвоєнню навчального матеріалу.

Мета дослідження – вивчення музичних вподобань підлітків і визначення впливу різних жанрів музики на розвиток властивостей уваги старшокласників.

Результати досліджень та їх обговорення. Дослідження проведено на базі Уманського ліцею № 3 Уманської міської ради Черкаської області. Усі етапи експерименту ґрунтувались на добровільних засадах та за добровільною згодою учнів. З метою оцінки рівня музичної культури, виявлення музичних смаків, серед учнів 8-11 класів було проведено діагностичне анкетування «Мої музичні вподобання».

Аналіз результатів показав: віковий склад: серед 51 респондентів – 29 віком 13-14 років, 22 – 16-17 років; співвідношення статей: 30 дівчат і 21 хлопчик; час прослуховування музики: 17,6% цілодобово, 51% використовують музичний фон кілька годин на добу, 27,5% – кілька разів на тиждень, ті, хто не слухає музику взагалі у вибірці – відсутні; перевагу таких жанрів: 21% слухають поп-музику, по 10% вподобали рок і електрик, найменше – 7% віддали перевагу класичній, а 48% з 51 вважають себе меломанами без визначених вподобань; 84,3% люблять і слухають досить гучну музику; використання музичних платформ YouTube Music, додатків Spotify, SoundCloud; 80,4% проти 19% мають свій плейлист, демонструючи схильність до повторних прослуховувань; 23,5% обрали контент українською, 45%

англійською, 31% – не визначилися; понад 92% використовують музичний фон у побуті, 53% – під час виконання домашніх завдань; 76,5% стверджують, що музика позитивно впливає на ефективність їх праці; 43,1% вважають доцільним музичний супровід під час уроків і 94,1% в обов'язковому порядку на перервах.

Під час дослідження вивчали вплив різних жанрів музики на основні параметрів уваги здобувачів освіти 11 класів: концентрацію, обсяг, розподіл, швидкість виконання завдання. Дослідження проводилися з 08.00 до 12.30 години, групою здобувачів освіти № 1 з 30 осіб, які виконували валідовані тести за допомогою смартфонів на платформі Interactive Portal-Book of Self-Development Methods. Група № 2 (30 осіб) виконувала тест без музичного супроводу (контроль), але з дотриманням усіх інших умов експерименту. Для музичного супроводу використовувались композиції жанрів: популярна (поп) – український гурт Sadsvit «Небо»; рок – гурт Queen «I Want to Break Free»; електрик – авторська Дмитро Сиволап «Волошкове поле»; класична – симфонія № 9 оп.125 Людвіга ван Бетховена.

Для вивчення концентрації уваги та швидкості обробки інформації використовували, як фактор впливу, жанр популярної поп-музики, а саме, композицію українського гурту Sadsvit «Небо» та методику «Коректурна проба Бурдона» (Кравченко В.І., Чернінський А.О., Макарчук М.Ю., 2010, с. 27-29).

Розрахункові показники корекційного тесту Бурдона та їх середні арифметичні показники дослідної вибірки наведені в таблиці 1.

У результаті дослідження нами виявлено: зменшення часу на виконання завдання та кількості помилок; збільшення числа правильно обраних символів, обсягу опрацьованої інформації, індексу розумової продуктивності.

Отже, прослуховування поп-музики під час виконання тесту призвело до зростання швидкості обробки інформації та концентрації уваги на 22%.

З метою вивчення швидкості обробки інформації проводили дослідження за методикою «Таблиці Шульте» (Кравченко В.І., Чернінський А.О., Макарчук М.Ю., 2010, с. 31-32). Для оцінки впливу музики застосовували композицію рок-гурту Queen «I Want to Break Free».

Розрахункові показники тесту за методикою «Таблиці Шульте» та їх середні арифметичні показники дослідної вибірки наведені в таблиці 2.

Отже, результати дослідження показали, що виконання завдання в супроводі рок-музики сприяє безпомилковому виконанню при зменшенні загального витраченого часу та часу на обдумування однієї відповіді.

Визначення параметрів обсягу та концентрації уваги можна проводити, використовуючи методику «Переплутані лінії» (Кравченко В.І., Чернінський А.О., Макарчук М.Ю., 2010, с. 30).

Дослідження проводили під музику жанру «електрик», використовуючи авторську

Таблиця 1

**Результати показників методики «Коректурна проба Бурдона»
за умови впливу поп-музики (Sadsvit «Небо»)**

Критерії	Норма	Контроль	Поп-музика
Загальна кількість символів	1680	1680	1680
Витрачений час (с)	300	307	302
Правильно обраних символів	130	86	105
Загальна кількість символів	135	135	135
Кількість неправильно обраних символів	5	8	3
Кількість стрічок	42	42	42
Кількість опрацьованих стрічок	42	30	35
Показник швидкості уваги (символів/с)	5,6	5,47	5,56
Показник точності роботи	1	0,7	0,84
Показник перемикання	0	14,2	14,2
Індекс розумової продуктивності	1680	1176	1411
Розумова продуктивність (символів/с)	5	3,54	4,76
Концентрація (%)	96	72	94
Швидкість обробки	1,6	1,05	1,43

Таблиця 2

**Результати показників методики «Таблиці Шульте»
за умови впливу рок-музики (Queen «I Want to Break Free»)**

Критерії	Норма	Контроль	Рок-музика
Кількість правильних	36	34	36
Кількість помилок	0	2	0
Загальна кількість відповідей	36	36	36
Загальний витрачений час (с)	60	62	60
Середній час на 1 відповідь	2000	1722	1667

Таблиця 3

**Результати показників методики «Переплутані лінії»
за умови впливу електрик-музики (Д. Сиволап «Волошкове поле»)**

Критерій	Норма	Контроль	«Електрик»
Кількість стрічок	25	25	25
Кількість правильно обраних стрічок	22-25	21	25
Кількість помилок	0-3	4	0
Витрачено часу (с)	<420	478	322
Обсяг уваги U	U=T	573,6	322
Коефіцієнт концентрації	<420	401,52	322
Дефіцит концентрації	0	76,48	0

Таблиця 4

**Результати показників методики «Тест Струпа» за умови впливу класичної музики
(симфонія № 9 оп.125 Людвіга ван Бетховена)**

Критерій	Норма	Контроль	Класична
Кількість + виборів 1 рівня	30	29	30
Кількість – виборів 1 рівня	0	1	0
Кількість + виборів 2 рівня	29-30	28	30
Кількість – виборів 2 рівня	0-1	2	0
Загальний час виконання (с)	120	137	124
Середній час вибору на 1 р. (мс)	1000	1023	923
min час вибору на 1 р. (мс)	–	695	633
max час вибору на 1 рівні (мс)	2000	2134	1945
Середній час вибору на 2 р. (мс)	1500	1742	1699
min час вибору на 2 р. (мс)	–	1988	824
max час вибору на 2 рівні (мс)	2000	3251	2874

композицію «Волошкове поле». Результати заносимо до таблиці 3.

Отже, результати дослідження показали зростання коефіцієнту концентрації, обсягу уваги та значне зменшення затраченого часу на виконання завдання.

Методику «Тест Струпа» (тест кольорових слів) доцільно використовувати для вивчення властивостей розподілу та переключення уваги. Вона базується на відомому серед психологів «ефекті Струпа», відповідно до якого у людини виникають складнощі з визначенням кольору напису, якщо напис протирічить кольору (Stroop J. R., 1935, р. 643 – 662; Бондаренко

М. П. Кравченко В. І., Бондаренко О. В. та ін., 2016, с. 7-18).

Результати тестування узагальнені в таблиці 4.

Отже, використання класичної музики покращує гнучкість мислення, підвищує швидкість обробки інформації та розподіл. Зокрема, зменшився максимальний час вибору на 1 рівні на 189 мс (з 2134 до 1945 мс), на 2 рівні на 377 мс (з 3251 до 2874 мс) і на цьому ж рівні суттєво зменшився мінімальний час вибору – в 2 рази (з 1988 до 824 мс), загальний час для виконання тесту зменшився на 13 с.

Загалом, зафіксовано позитивний вплив музики на увагу підлітків.

Висновки

У результаті дослідження експериментально доведено позитивний вплив різних жанрів музики, а саме: популярної (поп), року, електронної, класичної на динаміку параметрів уваги здобувачів освіти 11 класів Уманського ліцею № 3 Уманської міської ради Черкаської області. Групи № 1 (контроль – без музики) та № 2 (з музичним фоном) у складі 30 ліцеїстів кожна, виконували валідовані тести за допомогою смартфонів на платформі Interactive Portal-Book of Self-Development Methods.

Узагальнюючи результати використаних методик, слід зосередитись на основних, виявлених і підтверджених статистично:

1. коефіцієнти концентрації уваги і швидкість обробки інформації зросли на 22% та на 0,38 одиниць відповідно (поп-музика, «Коректурна таблиця Бурдона»);

2. зменшено загальний витрачений час на обдумування відповіді на 55 мс та зменшилась кількість помилок (рок-музика, «Таблиці Шульте»);

3. зросли коефіцієнти концентрації на 79,52 одиниць та обсяг уваги на 251,6 одиниць, затрачений час на виконання завдання зменшився на 156 с (електрик-музика, «Переплутані лінії»);

4. зменшився максимальний час вибору на 1 рівні на 189 мс (з 2134 до 1945 мс), на 2 рівні на 377 мс (з 3251 до 2874 мс), а також

зменшився мінімальний час вибору – в 2 рази (з 1988 до 824 мс), загальний час для виконання тесту зменшився на 13 с (класична музика, «Тест Струпа»).

5. під час вивчення музичних вподобань 51 ліцеїста шляхом опитування з'ясовано, що 68,5% підлітків використовують музичний фон більше кількох годин на добу, віддаючи перевагу українському та англomовному контенту; 80,4% мають свій плейлист, демонструючи схильність до повторних прослуховувань; 21% опитаних впадають поп музику, 10% – рок, 10% – електрик, 7% – схильні до прослуховування класичної музики, а 48% вважають себе меломанами без визначених вподобань;

6. створено музичний плейлист «Слухай і Вчись» в додатку Spotify.

Здійснений аналіз впливу музики, як чинника, дозволяє стверджувати, що вона, в цілому підвищує ефективність когнітивних функцій мозку старшокласників, зокрема такі властивості уваги, як концентрація, обсяг, переключення. Врахування адміністрацією освітніх закладів музичних вподобань, відображених у вигляді авторського музичного плейлиста «Слухай і Вчись» та досліджених закономірностей сприятиме організації комфортних умов навчання та відпочинку, а також розробці інноваційних методик підвищення ефективності сприйняття навчального матеріалу.

ЛІТЕРАТУРА:

- Бондаренко М. П., Кравченко В. І., Бондаренко О. В., Макачук М. Ю. ЕЕГ – кореляти аналізу інформації при проходженні емоційного Струп тесту на фоні пред'явлення зображень IAPS. *Вісник Черкаського університету*. Серія : Біологічні науки. 2016. № 1. С. 7–18.
- Сльчанінова Т. М. Розвиток уваги першокласників у період адаптації до навчання : автореф. дис. ... канд. психол. наук : 19.00.07. Харківський нац. пед. ун-т ім. Г.С. Сковороди. Х., 2011. 20 с.
- Котова О. В., Суханова Г. П. Взаємодія музики і здоров'я як чинник фізичного розвитку дітей. *Актуальні проблеми фізичного виховання студентів в умовах кредитно-модульної системи навчання* : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. (Дніпропетровськ, 10-11 квітня 2014 року). Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, 2014. С. 252–257.
- Кравченко В. І., Чернінський А. О., Макачук М. Ю. Методичні рекомендації до практичних занять з психофізіології для студентів біологічних факультетів спеціальності «фізіологія людини і тварин». К. : ООО «Геопринт», 2010. 74 с.
- Москальова А. С., Москальов М. В. Методи психодіагностики в навчально-виховному процесі : навч. посібник. Київ, 2014. 360 с.
- Савченко Т. Л. Сучасні напрямки дослідження уваги – психофізіологічні аспекти, теорії функціонування і розвиток властивостей. *Актуальні проблеми психології* : зб. наук. праць Інституту психології імені Г. С. Костюка НАПН України. 2019. Вип. 19. С. 19–208.
- Вікова та педагогічна психологія : навч. посіб. / Скрипченко О. В., Долинська Л. В., Огороднійчук З. В., Лисянська Т. та ін. Київ : Просвіта, 2001. 416 с.

8. Шевчик Р. В. Дослідження та корекція уваги у підлітків. *Психологія: реальність і перспективи*. 2015. Вип. 4. С. 288–292.
9. Bonneville-Roussy A., Rentfrow P. J., Xu M. K., & Potter J. Music through the ages: Trends in musical engagement and preferences from adolescence through middle adulthood. *Journal of Personality and Social Psychology*. 2013. 105(4). 703–717. <https://doi.org/10.1037/a0033770>
10. Chamorro-Premuzic T., Fagan, P., & Furnham A. Personality and uses of music as predictors of preferences for music consensually classified as happy, sad, complex, and social. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*. 2010. 4(4). 205–213. <https://doi.org/10.1037/a0019210>
11. De Bettencourt M. T., Cohen J. D., Lee R. F., Norman K. A. Closed-loop training of attention with real-time brain imaging. URL: <http://www.nature.com/neuro/journal/v18/n3/full/nn.3940.html>
12. Gaspar J. M., McDonald J. J. Suppression of Salient Objects Prevents Distraction in Visual Search. *The Journal of Neuroscience*. 2014 (16). URL: <http://www.jneurosci.org/content/34/16/5658>
13. Hameroff S., Penrose R. Reply to criticism of the «Orch OR qubit» – «Orchestrated objective reduction» is scientifically justified» *Physics of Life Reviews*. 2014. (11). P. 104–112. URL: <http://www.quantumconsciousness.org/sites/default/files/>
14. Kabat-Zinn J. Mindfulness Meditation: 8 Quick Exercises That Fit into Your Day. URL: <http://www.spring.org.uk/2014/04/mindfulness-meditation-8-quick-exercises-that-easily-fit-into-your-day.php>
15. Marcelo Bigliassi, Costas I. Karageorghis, Daniel T. Bishop, Alexander V. Nowicky, Michael J. Wright. Cerebral effects of music during isometric exercise: An fMRI study. *International Journal of Psychophysiology*. 2018. V. 133. P. 131–139. URL: <https://www.researchgate.net/publication/>
16. Stroop J. R. Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of experimental psychology*. 1935. № 18. P. 643–662.
17. Thomas Schäfer, Claudia Mehlhorn. Can personality traits predict musical style preferences? A meta-analysis. *Psychology, Personality and Individual Differences*. 2017. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0191886917303215>

REFERENCES:

1. Bondarenko, M. P., Kravchenko, V. I., Bondarenko, O. V., Makarchuk, M. Yu. (2016). EEH – koreliaty analizu informatsii pry prokhodzhenni emotsiinoho Strup testu na foni prediavlennia zobrazhen IAPS [EEG correlates of information analysis during the emotional Stroop test against the background of IAPS images]. *Visnyk Cherkaskoho universytetu. Seriya : Biologichni nauky – Bulletin of Cherkasy University. Series: Biological Sciences*. 1, 7–18. [in Ukrainian].
2. Ielchaninova, T.M. (2011). Rozvytok uvahy pershoklasnykiv u period adaptatsii do navchannia [Development of attention in first-graders during the period of adaptation to learning]. *Extended abstract of candidate's thesis Kharkivskiy nats. ped. un-t im. H.S. Skovorody. Kh.* [in Ukrainian].
3. Kotova, O. V., & Sukhanova, H. P. (2014). Vzaємomodii muzyky i zdorovia yak chynnyk fizychnoho rozvytku ditei [The interaction of music and health as a factor in the physical development of children]. *Aktualni problemy fizychnoho vykhovannia studentiv v umovakh kredytno-modulnoi systemy navchannia – Current problems of physical education of students in the conditions of the credit-modular system of education*. (pp. 252–257). Dnipropetrovskiy natsionalnyi universytet imeni Olesia Honchara [in Ukrainian].
4. Kravchenko, V.I., Cherninskyi, A.O., & Makarchuk, M.Iu. (2010). *Metodychni rekomendatsii do praktychnykh zaniat z psykhoфизиології dlia studentiv biologichnykh fakultetiv spetsialnosti «физиологія людини і тварин» [Methodological recommendations for practical classes in psychophysiology for students of biological faculties specializing in “human and animal physiology”]*. Kyiv: ООО «Неопрынт» [in Ukrainian].
5. Moskalova, A.S., & Moskalov, M.V. (2014). *Metody psykhiadiagnostyky v navchalno-vykhovnomu protsesi [Methods of psychodiagnosics in the educational process]*. Kyiv [in Ukrainian].
6. Savchenko, T.L. (2019). Suchasni napriamky doslidzhennia uvahy – psykhoфизиологични aspekty, teorii funktsionuvannia i rozvytok vlastyvosti [Modern directions of attention research – psychophysiological aspects, theories of functioning and development of properties]. *Aktualni problemy psykholohii – Current problems of psychology : zb. nauk. prats Instytutu psykholohii imeni H.S. Kostiuka NAPN Ukrainy*. (V. 19.), (pp. 19–208) [in Ukrainian].
7. Skrypchenko, O.V., Dolynska, L.V., Ohorodniichuk, Z.V., Lysianska, T. ta in. (2001). *Vikova ta pedahohichna psykholohiia [Age and pedagogical psychology]*. Kyiv : Prosvita [in Ukrainian].
8. Shevchyk, R.V. (2015). Doslidzhennia ta korektsiia uvahy u pidlitkiv [Research and correction of attention in adolescents]. *Psykholohiia: realnist i perspektivy – Psychology: reality and prospects*. (V. 4.), (pp. 288–292) [in Ukrainian].
9. Bonneville-Roussy, A., Rentfrow, P. J., Xu, M. K., & Potter, J. (2013). Music through the ages: Trends in musical engagement and preferences from adolescence through middle adulthood. *Journal of Personality and Social Psychology*. 105(4). 703–717. <https://doi.org/10.1037/a0033770>

10. Chamorro-Premuzic, T., Fagan, P., & Furnham, A. (2010). Personality and uses of music as predictors of preferences for music consensually classified as happy, sad, complex, and social. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*. 4(4). 205–213. <https://doi.org/10.1037/a0019210>
11. De Bettencourt, M.T., Cohen, J.D., Lee, R.F., & Norman K.A. Closed-loop training of attention with real-time brain imaging. Retrieved from: <http://www.nature.com/neuro/journal/v18/n3/full/nn.3940.html>
12. Gaspar, J.M., & McDonald, J.J. (2014). Suppression of Salient Objects Prevents Distraction in Visual Search. *The Journal of Neuroscience*. (16). Retrieved from: <http://www.jneurosci.org/content/34/16/5658>
13. Hameroff, S., & Penrose, R. (2014). Reply to criticism of the «Orch OR qubit» – «Orchestrated objective reduction» is scientifically justified» *Physics of Life Reviews*. (11). P. 104–112. Retrieved from: <http://www.quantumconsciousness.org/sites/default/files/>
14. Kabat-Zinn, J. Mindfulness Meditation: 8 Quick Exercises That Fit into Your Day. Retrieved from: <http://www.spring.org.uk/2014/04/mindful-ness-meditation-8-quick-exercises-that-easily-fit-into-your-day.php>
15. Marcelo Bigliassi, Costas I. Karageorghis, Daniel T. Bishop, Alexander V. Nowicky, & Michael J. Wright (2018). Cerebral effects of music during isometric exercise: An fMRI study. *International Journal of Psychophysiology*. V. 133. P. 131–139. Retrieved from: <https://www.researchgate.net/publication/>
16. Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of experimental psychology*. № 18. P. 643–662.
17. Thomas Schäfer, Claudia Mehlhorn (2017). Can personality traits predict musical style preferences? A meta-analysis. *Psychology. Personality and Individual Differences*. Retrieved from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0191886917303215>

UDC 524.31.084, 524.384, 524.352.3

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-12>

Petro TROKHIMCHUCK

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the A. V. Svidzynskyi Department of Theoretical and Computer Physics, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2737-0506>

SCOPUS AUTHOR ID: 8383601100

To cite this article: Trokhimchuck, P. (2025). Deiaki problemy modeliuvannia bilykh karlykiv [Some problems of white dwarf modeling]. *Physics and Education Technology*, 1, 92–100. doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-12>

SOME PROBLEMS OF WHITE DWARF MODELLING

Main peculiarities of formulation main principles and criteria of white dwarf theories are analyzed. Short comparative analysis of main methods of modeling is represented. All these methods are based on the conditions of equilibrium. The role of A. Eddington, R. Fowler, E. Stoner and S. Chandrasekar researches in the creation this theory is discussed. A. Eddington proposed to use the Lane-Emden equations to construct the theory of white dwarfs, which allow us to describe processes in polytropic gas spheres. It is shown that Stoner method, Lane-Emden equations and Einstein equations is based on the search of equilibrium conditions for sphere or simple to sphere symmetries. The role of the development of theoretical physics (Fermi-Dirac statistics) in the creation of this theory is shown. It should be noted that thanks to Stoner's research, the Pauli principle and one of the first applications of Fermi-Dirac statistics for degenerate electronic systems appeared in the Bohr theory of the atom precisely in the theory of white dwarfs. Main peculiarities of Stoner method and Lane-Emden equations are observed. Stoner's method is based on the idea of studying the equilibrium of a star based on energetic considerations. The Lane-Emden equations were constructed for gaseous spheres with different polytropic indices. It was Emden's introduction of thermodynamics into these equations that allowed them to be used in astrophysics. For these equations, it is necessary to additionally introduce the conditions for the rotation of the star. Einstein's equation is also on the one hand a condition of energy equilibrium (effective potential energy equals kinetic energy) for inhomogeneous systems, and on the other hand it is a generalization of the special theory of relativity to curvilinear geometry. The generalization of the interval itself is nothing more than a metric of the corresponding space-time. Rotation is included in the equation from the very beginning. Peculiarities of application methods of general relativity for modelling white dwarf structure and processes are analyzed too.

Key words: critical processes, white dwarf, S. Chandrasekhar, Lane-Emden equation, equilibrium conditions, phase transformations, general relativity.

Петро ТРОХИМЧУК

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2737-0506>

SCOPUS AUTHOR ID: 8383601100

Бібліографічний опис статті: Трохимчук, П. (2025). Деякі проблеми моделювання білих карликів. *Фізика та освітні технології*, 1, 92–100, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-12>

ДЕЯКІ ПРОБЛЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ БІЛИХ КАРЛИКІВ

Проаналізовано основні особливості формулювання основних принципів і критеріїв теорій білих карликів. Подано короткий порівняльний аналіз основних методів моделювання. Всі ці методи базуються на умовах рівноваги. Обговорюється роль досліджень А. Еддінгтона, Р. Фаулера, Е. Стонера та С. Чандрасекара у створенні цієї теорії. А. Еддінгтон запропонував використовувати рівняння Лейна-Емдена для побудови теорії білих карликів, які дозволяють описувати процеси в політропних газових сферах. Показано, що метод Стонера, рівняння Лейна-Емдена та рівняння Ейнштейна ґрунтуються на пошуку умов рівноваги для симетрій сфери або відрізка до сфери. Показано роль розвитку теоретичної фізики (статистики Фермі-Дірака) у створенні цієї

теорії. Слід зазначити, що завдяки дослідженням Стонера в теорії атома Бора саме в теорії білих карликів з'явився принцип Паулі і одне з перших застосувань статистики Фермі-Дірака для вироджених електронних систем. Розглянуто основні особливості методу Стонера та рівнянь Лейна-Емдена. Метод Стонера базується на ідеї вивчення рівноваги зірки на основі енергетичних міркувань. Побудовано рівняння Лейна-Емдена для газоподібних куль з різними показниками політропії. Саме введення Емденом термодинаміки в ці рівняння дозволило використовувати їх в астрофізиці. Для цих рівнянь необхідно додатково ввести умови обертання зірки. Рівняння Ейнштейна також є, з одного боку, умовою енергетичної рівноваги (ефективна потенціальна енергія дорівнює кінетичній енергії) для неоднорідних систем, а з іншого – узагальненням спеціальної теорії відносності на криволінійну геометрію. Узагальнення самого інтервалу є не що інше, як метрика відповідного простору-часу. Обертання включено в рівняння з самого початку. Проаналізовано особливості застосування методів загальної теорії відносності для моделювання структури та процесів білих карликів.

Ключові слова: критичні процеси, білі карлики, С. Чандрасекар, рівняння Лейна-Емдена, умови рівноваги, фазові перетворення, загальна теорія відносності.

Introduction

Main peculiarities of formulation main principles and criteria of white dwarf theories are analyzed. Short comparative analysis of main methods of modeling is represented. All these methods must be based on the conditions of equilibrium. It is shown that Stoner method (Stoner, 1929), Lane-Emden equations (Chandrasekhar, 1938) and Einstein equations (Chandrasekhar, 1964) is based on the search of equilibrium conditions for sphere or sample to sphere symmetries. Main peculiarities of Stoner method and Lane-Emden equations are observed. Peculiarities of application methods of general relativity for modelling white dwarf structure and processes are analyzed too.

Main concepts of theory of white dwarfs are discussing (Vavrukh, 2018). The role of A. Eddington (Eddington, 1926), R. Fowler (1926), E. Stoner (1929) and S. Chandrasekhar (1930) researches in the creation this theory is discussed. The role of the development of theoretical physics (Fermi-Dirac statistics) in the creation of this theory is shown (Stoner, 1924; Fowler, 1926).

It should be noted that thanks to Stoner's research (Stoner, 1924), the Pauli principle and one of the first applications of Fermi-Dirac statistics for degenerate electronic systems appeared in the Bohr theory of the atom precisely in the theory of white dwarfs.

A. Eddington, R. Fowler, their student S. Chandrasekhar, E. Stoner, V. Anderson and others made the main contribution to the development of the theory of white dwarfs (Nauenberg, 2008; Vavrukh, 2018).

A. Eddington initiated the study of white dwarfs and, in addition, pointed out that the source of the stars' energy is thermonuclear reactions of hydrogen and helium synthesis (Eddington, 1926). He also proposed to use the Lane-Emden equations to

construct the theory of white dwarfs, which allow us to describe processes in polytropic gas spheres. This method for white dwarfs was developed by A. Fowler (Fowler, 2029) and most of all by S. Chandrasekhar (Chandrasekhar, 1938).

R. Fowler was the first to draw attention to the use of Fermi-Dirac statistics for the theory of white dwarfs (Fowler, 1926). However, the first theory for former dwarfs was built by E. Stoner (Stoner, 1929). At the heart of his theory he put the variational principle, which he used for total energy. Vio estimated the density and mass of the white dwarf. This same method was used by S. Chandrasekhar to determine the density of a white dwarf. He built a more complete theory of a gray dwarf based on the Lane-Emden equations.

It should be noted that all astrophysical models are built based on considerations of equilibrium, and are still tied in one way or another to spherical symmetry. Thus, the Lane-Emden equations are derived for the equilibrium conditions of a gas sphere taking into account the corresponding polytropic process. Chandrasekhar separately derived this equation for isothermal case too (Chandrasekhar, 1938). However, these equations do not take into account the rotation of the star (Vavrukh, 2018). Einstein's equation is nothing but the equality of potential (effective) energy, which also takes into account the rotation and kinetic energy (Barrow, 2007). That is, it is nothing but an extension of the methods of celestial mechanics. All the metrics that are in the general theory of relativity, roughly speaking, are derived from the spherical metric (Barrow, 2007). Therefore this method as more universal for astrophysical applications was recommended by A. Eddington (Chandrasekhar, 1964).

In the theory of degenerate dwarfs by S. Chandrasekhar is generalized by constructing multiparameter and multiphase models that take into

account the incomplete degeneracy of the electronic subsystem, the presence of interparticle interactions, magnetic fields, variable chemical content along the radius, and axial rotation of stars (Varukh, 2018). It is allowed to adequately describe and provide interpretation of modern observed data. Based on the solution of the equilibrium equations, the dependence of the structural and energy characteristics of dwarfs on the parameters of the models was determined. The inverse problem of the theory of degenerate dwarfs was solved – the determination of the main structural and thermodynamic parameters of the models based on data on the masses, radii, and effective temperatures of observed field dwarfs and dwarfs in binaries systems (Vavruk, 2018).

S. Chandrasekhar theory of white dwarfs was developed in second half of 20th century. In the works of E. Shatsman, S. Chandrasekhar, S. Kaplan, R. James L. Mestell, I. Zeldovich, and I. Novikov, an elementary theory of cooling of degenerate dwarfs was constructed (Vavruk, 2018). The issues of stability in relation to neutronization processes, the effects of the general theory of relativity and the influence of axial rotation, etc., were also considered. Much less attention has been paid to the generalization of models of the internal structure of dwarfs. Here it should be noted the work of E. Solpiter on the equation of state of the electron-nuclear model at high couplings with approximate consideration of Coulomb interactions (at $T = 0$ K) and the work of T. Hamada and E. Solpiter devoted to the calculation of the «mass-radius» ratio for homogeneous two-component models corresponding to chemical elements with a nuclear charge of $2 \leq z \leq 26$ based on the equation of state obtained by E. Solpiter and with the acceleration of neutronization processes, but taking into account the effects of the general theory of relativity (Vavruk, 2018).

Main results

The existence of a mass limit for white dwarfs is usually attributed solely to the late astrophysicist Subrahmanyan Chandrasekhar, and this limit is named after him (Chandrasekhar, 1938). But as is often the case, the history of this discovery is more nuanced. In this note I will show that the existence of a maximum mass was first established by Edmund C. Stoner, a physicist who began experimental research under the supervision of Rutherford at the Cavendish in Cambridge, but later switched to

theoretical work. Rutherford recommended Stoner to a position at the Physics department of the University of Leeds where he spent his entire career (Nauenberg, 2008).

According to G. Cantor, he was “probably the leading Cavendish-trained theoretical physicist of the 1920’s, although he learned theory mostly on his own, and became known for his work on magnetism (Nauenberg, 2008). Unfortunately, Stoner suffered from diabetes and poor health which restricted his travels, and this may account for the fact that he did not receive wider recognition for his achievements. In 1924 Stoner wrote a paper on the distribution of electrons among atomic levels (Stoner, 1924). In the preface of the fourth edition of his classic book, “Atomic Structure and Spectral Lines”, Arnold Sommerfeld gave special mention to “einen grossen Fortschritt [a great advancement]” brought about by Stoner’s analysis, which then came to the attention of Wolfgang Pauli, and played an important role in his formulation of the exclusion principle in quantum physics (Nauenberg, 2008). Therefore, it is not surprising that Stoner’s interest in white dwarfs was aroused by Ralph H. Fowler’s suggestion (Fowler, 1926) that the exclusion principle could be applied to solve a major puzzle, the origin of the extreme high density of white dwarfs (Nauenberg, 2008), which could not be explained by classical physics.

At the time, the conventional wisdom was that the source of internal pressure which maintained all stars in equilibrium against gravitational collapse was the internal pressure of the matter composing the star which had been heated into a gas presumably, according to Eddington, by “subatomic energy” (Eddington, 1926). But when this supply of energy is exhausted and the star cools, Fowler proposed that a new equilibrium would ensue, even at zero temperature, due to the “degeneracy” pressure of the electrons caused by the exclusion principle (Nauenberg, 2008). Fowler, however, did not attempt to determine the equilibrium properties of such a star which he regarded as “strictly analogous to one giant molecule in the ground state”. Apparently he was unaware that at the time, Llewellyn H. Thomas had developed a mathematical method to solve this problem in atomic physics (Nauenberg, 2008). Subsequently, Stoner developed a novel minimum energy principle to obtain the equilibrium properties of such dense stars, and by applying Fowler’s non-relativistic

equation of state for a degenerate electron gas in a constant density approximation, he found that the density increases with the square of the mass of the star (Nauenberg, 2008). In such a gas the mean momentum of an electron is proportional to the cube root of the density, and Wilhem Anderson, a privatdozent at Tartu University, Estonia, who had read Stoner's paper, noticed that for the mass of a white dwarf comparable to or higher than the mass of the Sun, the density calculated from Stoner's non-relativistic mass-density relation implied that the electrons become relativistic (Nauenberg, 2008). Hence, Anderson concluded that in this regime, this relation gave "gröblich falschen Resultaten [gross false results]" for the properties of a white dwarf. He attempted to extend the equation of state of a degenerate electron gas to the relativistic domain, but he gave an incorrect formulation which, fortuitously, indicated that Stoner's minimum energy principle implied a maximum value for the white dwarf mass. Alerted by Anderson's paper, Stoner then derived the correct relativistic equation of state¹⁶, and re-calculated, in a constant density approximation, the properties of white dwarfs for arbitrary densities (Nauenberg, 2008). Thus, he obtained, now on solid theoretical grounds, the surprising result that when the density approaches infinity, the mass of the star reaches a maximum value.

Stoner's method (Nauenberg, 2008) for obtaining the properties of white dwarfs was based on his concept that at equilibrium, the sum of the internal energy and the gravitational energy of the star should be a minimum for a fixed mass of the star.

Fowler had assumed that the atoms in a white dwarf were completely ionized, and that the internal energy and pressure was entirely due to a degenerate electron gas, while the ions mainly accounted for the mass of the star. Stoner understood that as the star contracts, the gravitational energy decreases, and since the density increases, the internal energy also increases. Hence, the total energy of the star either decreases or increases during the contraction of the star. By conservation of energy, when the total energy of the star decreases, radiation and/or other forms of energy must be emitted by the star. But without an external source of energy, the total energy of an isolated star cannot increase. Hence the contraction of the star must end if the total energy reaches a minimum, and then the star reaches an equilibrium 1

Stoner's method for obtaining the properties of white dwarfs was based on his concept that at equilibrium, the sum of the internal energy and the gravitational energy of the star should be a minimum for a fixed mass of the star. Let E_G be the gravitational energy of the idealized star, E_K the total kinetic energy of electrons, n the number of electrons per unit volume. Then (Nauenberg, 2008) the equilibrium condition is given by

$$\frac{d}{dn}(E_G + E_K) = 0. \quad (1)$$

The total kinetic energy of electrons is equaled according to (Nauenberg, 2008):

$$E_K = \frac{8\pi V m_0^4 c^5}{h^3} \left[\frac{1}{8} x (1+x^2)^{1/2} (1+2x^2) - \frac{1}{3} x^3 - \log \left\{ x + (1+x^2)^{1/2} \right\} \right], \quad (2)$$

where

$$f(x) = \frac{1}{8} \left[x (1+x^2)^{1/2} (1+2x^2) - \log \left\{ x + (1+x^2)^{1/2} \right\} \right], \quad (3)$$

with

$$x = \frac{p_0}{m_0 c} = \frac{1}{m_0 c} \left(\frac{3h^3 n}{8\pi} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

and V is total volume of electrons, p_0 is maximum momentum.

For the gravitational potential energy with $2.5 m_H$ as the mean molecular weight of the material of the star (Nauenberg, 2008),

$$E_G = 3^{1/3} \left(\frac{4\pi}{5} \right)^{2/3} \frac{1}{h} G M^{5/3} m_H^{1/3} m_0 c x. \quad (5)$$

Kinetic energy (2) may be rewritten as

$$E_K = \frac{8\pi V m_0^4 c^5}{h^3} f_1(x), \quad (6)$$

where

$$f_1(x) = \left[\frac{1}{8} x (1+x^2)^{1/2} (1+2x^2) - \frac{1}{3} x^3 - \log \left\{ x + (1+x^2)^{1/2} \right\} \right]. \quad (7)$$

Substituting $M/2.5m_H$ for V , and further substituting for n as above,

$$E_K = \frac{3M m_0 c^2}{2.5m_H} \frac{f_1(x)}{x^3}. \quad (8)$$

Substituting receiving values of E_G and E_K in equilibrium condition we have

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{f_1(x)}{x^3} \right) = 10^{1/3} \left(\frac{\pi}{3} \right)^{2/3} \frac{G m_H^{4/3} M^{2/3}}{h c}. \quad (9)$$

Inserting numerical values,

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{f_1(x)}{x^3} \right) = F(x) = 1.483 \cdot 10^{-23} M^{2/3}, \quad (10)$$

where do we have

$$M = 1.751 \cdot 10^{34} [F(x)]^{3/2}. \quad (11)$$

Since the mean molecular weight is about $2.5m_H$ the limiting density is given by

$$\rho_0 = 2.5m_H n = 4.15 \cdot 10^{-24} n. \quad (12)$$

The density of the white dwarf stars is reconsidered from the point of view of the theory of the polytropic gas spheres and gives for the mean density of a white dwarf (under ideal conditions) the formula (Chandrasekhar, 1931)

$$\rho_{Ch} = 2.162 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{M}{M_G} \right)^2. \quad (13)$$

Corresponding Stoner formula has next form (Stoner, 1929)

$$\rho_s = 3.977 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{M}{M_G} \right)^2. \quad (14)$$

As we see $\frac{\rho_s}{\rho_{Ch}} = 1.84$ (Nauenberg, 2008).

It should be noted that Chandrasekhar in this case used the same method as Stoner (Chandrasekhar, 1938).

Fowler had assumed that the atoms in a white dwarf were completely ionized, and that the internal energy and pressure was entirely due to a degenerate electron gas, while the ions mainly accounted for the mass of the star. Stoner understood that as the star contracts, the gravitational energy decreases, and since the density increases, the internal energy also increases. Hence, the total energy of the star either decreases or increases during the contraction of the star. By conservation of energy, when the total energy of the star decreases, radiation and/or other forms of energy must be emitted by the star. But without an external source of energy, the total energy of an isolated star cannot increase. Hence the contraction of the star must end if the total energy reaches a minimum, and then the star reaches an equilibrium (Nauenberg, 2008).

To calculate the density at which the total energy minimum occurs, Stoner started with an approximation by assuming that the density was uniform. In his first paper (Nauenberg, 2008) he applied Fowler's non-relativistic form for the degeneracy energy, and he found that the density depends quadratically on the mass of the star.

Later, in collaboration with F. Tyler (Nauenberg, 2008), he also considered the modification for non-relativistic degeneracy when the density varies according to a polytrope distribution with index $n = 3/2$. Then, after Anderson (Nauenberg, 2008) pointed out that for a white dwarf with a mass of the order of the mass of the Sun Stoner's analysis implied that the electrons become relativistic, Stoner obtained the general relativistic equation of state for a degenerate electron gas, and he applied it to obtain the mass-density relation of white dwarfs for arbitrary densities (Nauenberg, 2008). By means of his minimum energy principle, he obtained an analytic expression which gave this relation in parametric form, showing that the density is a function that increases monotonically, and more rapidly than the square of the star's mass. In particular, he obtained the fundamental result that the density approaches infinity for a finite mass. This is the celebrated limiting mass of white dwarfs, in which the mass scale is entirely determined by some of the fundamental constants of Nature.

Chandrasekhar's early method was based on applying the Lane-Emden polytrope solution of the differential equation for gravitational equilibrium for the equation of state of a degenerate electron gas which obey power laws in the non-relativistic and the extreme relativistic regime (Chandrasekhar, 1938). He obtained results similar to Stoner's for the white dwarf mass-density relation in the non-relativistic regime, and for the critical white dwarf mass in the extreme relativistic regime (Nauenberg, 2008). For a power law dependence of the pressure p on the density ρ , i.e. $p \sim \rho^\gamma$, where the exponent γ is a constant, the solution of this equation is given by the Lane-Emden polytrope of index n , where $\gamma = 1 + \frac{1}{n}$. Chandrasekhar found these solutions in Eddington's book, "The Internal Constitution of Stars" (Eddington, 1926), which also contained the relations and numerical quantities that he needed for his calculations. In the non-relativistic limit, $\gamma = 5/3$, corresponding to a polytrope with index $n = 3/2$, and this Lane-Emden solution gives the central or mean density dependence as the square of the mass of the star, the same result which Stoner had obtained two years earlier in the uniform density approximation. Substituting Fowler's non-relativistic pressure density relation, Chandrasekhar found that the magnitude of

this dependence is smaller than Stoner's value by a factor approximately equal to two (Nauenberg, 2008). But somewhat earlier, motivated by Stoner's work, E. Milne already had carried out this calculation (Nauenberg, 2008), and at about the same time Stoner and Tyler also had applied the $n = 3/2$ polytrope density in Stoner's minimum energy method, and obtained the same result (Nauenberg, 2008). In the extreme relativistic limit, $\gamma = 4/3$, the corresponding polytrope has index $n = 3$, and the mass is independent of the central or mean density of the star. Thus Chandrasekhar calculated the magnitude of the critical mass of white dwarfs, which depends on the fundamental constants of nature, as had been shown a year before by Stoner, and on a dimensional constant for the $n = 3$ polytrope. This gave a critical mass about 20 % smaller than Stoner's value for the uniform density approximation (Nauenberg, 2008). By his own admission, however, Chandrasekhar was puzzled by his result ²¹, and he was not able to show until several months later that the critical mass was a maximum, and that in this limit the density was infinite. Moreover (Nauenberg, 2008), he did not pursue the implications of this result, and for several years he assumed that at a certain value of the density, matter would become incompressible, an idea proposed earlier by Milne to avoid infinite density at the center of his models of a star. Chandrasekhar formulated this idea as follows: «We are bound to assume therefore that a stage must come beyond which the equation of state $p = K\rho^{4/3}$ is not valid, for otherwise we are led to the physically inconceivable result that for $M = 0.92M_s$ [M_s = solar mass and $\mu = 2.5$], $r_1 = 0$, and $\rho = \infty$. As we do not know physically what the equation of state is that we are to take, we assume for definiteness the equation for the homogeneous material $\rho = \rho_{max}$, where ρ_{max} is the maximum density of which the material is capable...» (Nauenberg, 2008).

It is of interest to inquire what the relation is between Stoner's minimum energy method and Chandrasekhar's equation of gravitational equation. Treating Stoner's minimum energy principle as a variational problem in which the total energy is a functional of the density, and this density is a variable function of the radial density, this variational approach leads to the quantum mechanical ground state of an electron gas in the gravitational field of the ions, which maintain charge neutrality. This connection explains why Stoner and

Chandrasekhar obtained the same relations for the density and mass of the star as functions of fundamental constants, but with somewhat different dimensionless quantities. In particular, I will show that the solution to the generalized form of Stoner's variational problem for the minimum of the total energy of a dense star leads to the differential equation of gravitational equilibrium which Chandrasekhar applied in his work. I have not found any evidence, however, that either Stoner or Chandrasekhar were aware of this connection.

The total energy E of a zero temperature dense star supported entirely by degeneracy pressure against the gravitational attractive forces can be written as a functional of the mass density distribution ρ integrated over the volume of the star,

$$E = \int dv [\varepsilon(\rho) - u(p, r)], \quad (15)$$

where $\varepsilon(\rho)$ is the internal energy given as a function of the mass density ρ by Stoner's relativistic equation of state for a electron degenerate gas, $u(p, r)$ is gravitational energy

$$u(p, r) = -\frac{1}{2} G \int dv' \frac{\rho(r')\rho(r)}{|r-r'|}, \quad (16)$$

and G is Newton's gravity constant.

The equilibrium distribution ρ as a function of position r can be determined by evaluating the minimum of E subject to the condition that the total mass $M = \int dv \rho$ is fixed (Nauenberg, 2008). Assuming that ρ depends only on the radial distance r from the center of the star, this variational problem leads to the differential equation for gravitational equilibrium,

$$\frac{dP}{dr} = -G \frac{M(r)\rho(r)}{r^2} \quad (17)$$

here $P = \rho d\varepsilon/d\rho - \varepsilon$ is the pressure, and $M(r) = 4\pi \int r^2 \frac{M(r)\rho(r)}{r^2} dr$ is the mass inside the radius r . In the uniform density approximation, the solution of Stoner's minimum energy principle gives the relation

$$P = (3/20 \pi) GM^2/R^4, \quad (18)$$

where P is the mean pressure, M is the mass and R is the radius of the star. Stoner's relativistic equation of state for the pressure – density relation of a degenerate electron gas was first given in the form $P = Ax^4 F(x)$, where

$$F(x) = \frac{1}{8x^3} \left[\frac{3}{x} \log(x + \sqrt{1+x^2}) + \sqrt{1+x^2} (2x^3 - 3) \right], \quad (19)$$

and $x = \frac{3nh}{8\pi mc}$, Here n is the electrton density $n = \frac{3M}{4\pi R^3 m_H \mu}$, m_H is the proton mass, h is Planck's constant, c is the velocity of light, μ is the molecular weight and $\frac{8\pi m^4 c^5}{3h^3}$. Hence Stoner's analytic solution for the mass M of a white dwarf takes the form $M = M_c (4F(x))^{3/2}$. In the limit of small density $x = 1$, $F(x) = x/5$, and $P = (1/20)(3/\pi)^{2/3} (h^2/m)n^{5/3}$, which corresponds to Fowler's result for the pressure-density relation in the non-relativistic limit. In this limit we recover Stoner's original relation that the density n is proportional to the square of the mass M of the star, $n = (10\pi/3)(mc/h)^3 (M/M_s)^2$. The maximum momentum of the electrons is $p = (mc)x$, and therefore when x is of order one or larger the effects of relativity become important, as was first pointed out by Anderson, and independently by Chandrasekhar. In the limit of infinite density, $x \rightarrow \infty$, $F(x) \rightarrow 1/4$, which gives $P = (1/8)(3/\pi)^{1/3} n^{4/3}$, and $M = M_c$, with Stoner's critical mass expressed in terms of some of the fundamental constants of nature (Nauenberg, 2008),

$$M_{cs} = \left(\frac{3}{16\pi}\right) \left(\frac{5hc}{2G}\right)^{3/2} (m_H \mu)^{-2}. \quad (20)$$

Chandrasekhar's result for the critical mass, expressed in terms of fundamental constants, corresponds

$$M_{cCh} = u \left(\frac{\sqrt{6}}{8\pi}\right) \left(\frac{hc}{G}\right)^{3/2} (m_H \mu)^{-2}, \quad (21)$$

where $u = 2.018...$ is a constant obtained by numerically integrating the equation of gravitational equilibrium for an $n = 3$ polytrope. It can be readily verified that the critical mass evaluated with a mass density distribution corresponding to an $n = 3$ polytrope is 20% smaller than for a uniform density distribution. In other words

$$\frac{M_{cs}}{M_{cCh}} = 1.2. \quad (22)$$

Astrophysical methods used to study the structure of stars are characterized by the use of physical assumptions, the choice of which is dictated solely by the convenience of calculations (Chandrasekhar, 1964).

The Chandrasekhar limit is the maximum mass of a stable white dwarf star (Chandrasekhar, 1938). The currently accepted value of the Chandrasekhar limit is about $1.4 M_\odot$ (2.765×10^{30} kg).

White dwarfs resist gravitational collapse primarily through electron degeneracy pressure, compared to main sequence stars, which resist collapse through thermal pressure. The Chandrasekhar limit is the mass above which electron degeneracy pressure in the star's core is insufficient to balance the star's own gravitational self-attraction.

Normal stars fuse gravitationally compressed hydrogen into helium, generating vast amounts of heat. As the hydrogen is consumed, the stars' core compresses further allowing the helium and heavier nuclei to fuse ultimately resulting in stable iron nuclei, a process called stellar evolution. The next step depends upon the mass of the star. Stars below the Chandrasekhar limit become stable white dwarf stars, remaining that way throughout the rest of the history of the universe absent external forces. Stars above the limit can become neutron stars or black holes.

The Chandrasekhar limit is a consequence of competition between gravity and electron degeneracy pressure. Electron degeneracy pressure is a quantum-mechanical effect arising from the Pauli exclusion principle. Since electrons are fermions, no two electrons can be in the same state, so not all electrons can be in the minimum-energy level. Rather, electrons must occupy a band of energy levels. Compression of the electron gas increases the number of electrons in a given volume and raises the maximum energy level in the occupied band. Therefore, the energy of the electrons increases on compression, so pressure must be exerted on the electron gas to compress it, producing electron degeneracy pressure. With sufficient compression, electrons are forced into nuclei in the process of electron capture, relieving the pressure (Nauenberg, 2008).

In the nonrelativistic case, electron degeneracy pressure gives rise to an equation of state of the form $p = K\rho^{5/3}$, where P is the pressure, ρ is the mass density, and K_1 is a constant. Solving the hydrostatic equation leads to a model white dwarf that is a polytrope of index $3/2$ – and therefore has radius inversely proportional to the cube root of its mass, and volume inversely proportional to its mass (Nauenberg, 2008). As the mass of a model white dwarf increases, the typical energies to which degeneracy pressure forces the electrons are no longer negligible relative to their rest masses. The velocities of the electrons approach the speed of light, and special relativity must be taken into

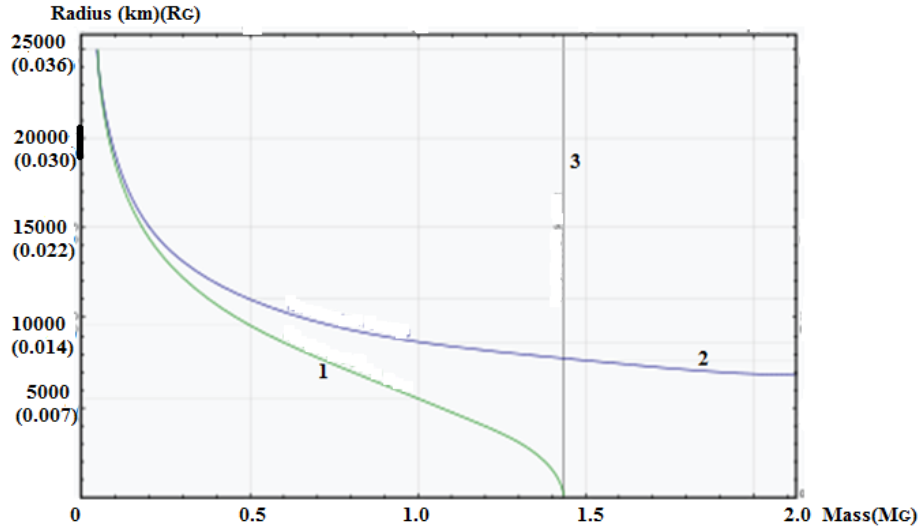


Fig. 1. Radius–mass relations for a model white dwarf [20-22]. 1 – Using the general pressure law for an ideal Fermi gas; 2 – Non-relativistic ideal Fermi gas; 3 – Ultrarelativistic limit (Nauenberg, 2008)

account. In the strongly relativistic limit, the equation of state takes the form $P = K_2 \rho^{4/3}$. This yields a polytrope of index 3, which has a total mass, M_{limit} , depending only on K_2 (Nauenberg, 2008).

For a fully relativistic treatment, the equation of state used interpolates between the equations $P = K_1 \rho^{5/3}$ for small ρ and $P = K_2 \rho^{4/3}$ for large ρ . When this is done, the model radius still decreases with mass, but becomes zero at M_{limit} . This is the Chandrasekhar limit (Nauenberg, 2008). The curves of radius against mass for the non-relativistic and relativistic models are shown in the Fig. 1 (Nauenberg, 2008). They are colored blue and green, respectively. μ_e has been set equal to 2. Radius is measured in standard solar radii or kilometers, and mass in standard solar masses.

For a more detailed analysis of astrophysical and cosmological processes, it is worth using Einstein's equations, or their simplified version of the Friedmann equation. Since they are practically a generalization of the energy balance equations (potential energy is equal to kinetic energy) (Barrow, 2007). The connection with thermodynamics of these equations was established by Tolman

(Tolman, 1931). The current state of this problem is given in Danylchenko (Danylchenko, 2022). If in the Lane-Emden equations physical processes are introduced through the polytrope, then in the general theory of relativity through the curvature of space-time (Chandrasekhar, 1964).

In addition, these processes of the transition of stars from one state to another are the subject of the physics of critical phenomena and from this point of view, more universal methods should be sought for the construction of such theories and models (Trokhimchuck, 2024).

Conclusions

1. Main peculiarities of modeling the dwite stars are represented.

2. Comparative analysis of Stoner energetic method and Lane-Emden equation method is observed.

3. It is shown that general relativity method is more general as Stoner and Lane-Emden method.

4. Perspective of the investigations new methods of modeling the white dwarfs and other compact astrophysical objects as development pf physics of critical processes are discussed too.

BIBLIOGRAPHY:

1. Barrow J. D. *New Theories of Everything. The Quest of Ultimate Explanation*. London : Panteon, 2007. 274 p.
2. Chandrasekhar S. *The density of white dwarf stars*. Philosophical Magazine, Series 7, 11-70, 1931. 592–596.
3. Chandrasekhar S. *Introduction to the study of stellar structure*. Chicago: University Press, 1938. 510 p.
4. Chandrasekhar S. *Dynamical Instability of Gaseous Masses Approaching the Schwarzschild Limit in General Relativity*. Astrophys.J., 1964, 140: 417-433.
5. Chandrasekhar S. *The Role of General Relativity: Retrospect and Prospect*. Proc. IAU Meeting, 1979.
6. Данильченко П. І. *Основи релятивістської гравітермодинаміки*. Вінниця: ТВОРИ, 2022. 200 с.

7. Eddington A. *The Internal Constitutions of the Stars*. Cambridge: University Press, 1926. 424 p.
8. Eddington A. *The physics of White Dwarfs Matter*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1940, 100. 582–594.
9. Fowler R. H. *On Dense Matter*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1926, 87(2). 114–122.
10. Milne E. *Stellar Structure and the Origin of Stellar Energy*. Nature, 1931, 127. 16–18, 27.
11. Nauenberg M., Edmund C. *Stoner and the discovery of the maximum mass of white dwarfs*. Journal for the History of Astronomy, 2008, 39. 297–312.
12. Trokhimchuck P. P. *To question about main principles and criteria of critical processes and phenomena*. IJARPS, 2024, 11(6). 1–17.
13. Stoner E. C. *The distribution of electrons among atomic levels*, Phil. Mag. Ser.6, 1924, 73. 719–736.
14. Stoner E. C. *The limiting density in White Dwarf Stars*. Philosophical Magazine 7,7, 1929, 41. 63–70.
15. Tolman R. *Relativity, Thermodynamics and Cosmology*. Oxford: Clarendon Press, 1934. 501 p.
16. Trokhimchuck P. P. *Some Problems of Modelling Astrophysical and Cosmological Critical Processes*. In: Eds. J. R. Ray @ S. S. Sharma. Recent Review and Research in Physics, 2024. Vol. 10, Ch.5. New Delhi: AkiNik Publications, pp. 65–94.
17. Ваврух М. В., Смеречинський С. В., Тишко Н. Л. Нові моделі в теорії структури вироджених карликів. Львів: Растр-7, 2018. 248 с.

REFERENCES:

1. Barrow, J. D. (2007). *New Theories of Everything. The Quest of Ultimate Explanation*. London: Panteon, 274 p.
2. Chandrasekhar, S. (1931). *The density of white dwarf stars*. Philosophical Magazine Series 7, 11-70, pp. 592–596.
3. Chandrasekhar, S. (1938). *Introduction to the study of stellar structure*. Chicago: University Press, 510 p.
4. Chandrasekhar, S. (1964). *Dynamical Instability of Gaseous Masses Approaching the Schwarzschild Limit in General Relativity*. Astrophys.J., Vol. 140, pp. 417–433.
5. Danylchenko, P. I. (2022). *Osnovy relyatyvisyskoi gravithermodynamiky [Fundamentals of relativistic gravithermodynamics]*. Vinnytsya: TVORY, 200 p. [In Ukrainian]
6. Eddington, A. (1926). *The Internal Constitutions of the Stars*. Cambridge: University Press, 424 p.
7. Eddington, A. (1940). *The physics of White Dwarfs Matter*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 100, pp 582–594.
8. Fowler, R. H. (1926) *On Dense Matter*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 87, is. 2, pp. 114–122.
9. Milne, E. (1931) *Stellar Structure and the Origin of Stellar Energy*. Nature, vol. 127, pp. 16–18, 27.
10. Nauenberg, M., and Edmund, C. (2008) *Stoner and the discovery of the maximum mass of white dwarfs*. Journal for the History of Astronomy, Vol. 39, pp. 297–312.
11. Trokhimchuck, P. P. (2024) *To question about main principles and criteria of critical processes and phenomena*. IJARPS, Vol. 11, is. 6, pp. 1–17.
12. Stoner, E. C. (1924) *The distribution of electrons among atomic levels*, Phil. Mag. Ser.6, vol.73, pp. 719–736.
13. Stoner, E. C. (1929) *The limiting density in White Dwarf Stars*. Philosophical Magazine 7,7, vol.41, pp. 63–70.
14. Tolman, R. (1934) *Relativity, Thermodynamics and Cosmology*. Oxford: Clarendon Press, 501 p.
15. Trokhimchuck, P. P. (2024) *Some Problems of Modelling Astrophysical and Cosmological Critical Processes*. In: Eds. J. R. Ray @ S. S. Sharma. Recent Review and Research in Physics, Vo. 10, Ch.5. New Delhi: AkiNik Publications, pp. 65–94.
16. Vavrukh, M. V., Smerechynskyi, S. V., & Tyshko, N. L. (2018). *Novi modeli v strukturi vyrodzhenykh karlykiv [New models in the theory of structure the degenerated dwarfs]*. Lviv: Rastr-7, 248 p. [in Ukrainian]

UDC 519.8, 53:517.9

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-13>

Petro TROKHIMCHUCK

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the A. V. Svidzynskyi Department of Theoretical and Computer Physics, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2737-0506>

SCOPUS AUTHOR ID: 8383601100

Vladyslav SAKHAN

Postgraduate Student at the A. V. Svidzynskyi Department of Theoretical and Computer Physics, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

To cite this article: Trokhimchuck, P., Sakhan, V. (2025). Systemy kinetychnykh rivnian Volterra ta Lotky-Volterra ta yikh rozshyrennia ta zastosuvannia [Volterra and Lotka-Volterra systems of kinetic equations and its expansion and applications]. *Physics and Education Technology*, 1, 101–107, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-13>

VOLTERRA AND LOTKA-VOLTERRA SYSTEMS OF KINETIC EQUATIONS AND THEIR EXPANSION AND APPLICATIONS

A systematic analysis of the systems of kinetic equations of Volterra and Lotka-Volterra is given. Population problems that had to be solved and their brief analysis are given. These problems include demographic, ecological, etc. problems. From a conceptual point of view, these problems are divided into two types: the problem of two species eating the same food (Volterra equation) and the predator-prey problem (Lotka-Volterra equation). The first problem arose from the problem of rabbit reproduction in Australia. In addition, in the same population biology, the problem arose when one species eats another (predator and prey). This problem was solved by many researchers in the field of biology and medicine, in particular virology. Its partial solution is given in the book of A. Lotka, and a more general one in the lectures of V. Volterra. Because of this, these equations are sometimes called the Lotka-Volterra equations. As in the first and second problems, it is necessary that there is enough resource (food) for the stationary stable existence and development of the dynamical system. We have analyzed the problems that are solved or that are expedient to be solved using these methods. Problems with a non-uniform temporal hierarchy of processes have also been analyzed. It has been shown that for solving such problems it is expedient to use the method of adiabatic elimination of variables. This method was used to solve kinetic problems in relaxation optics. These equations are expedient to use when there are several competing in-phase processes. Based on the general analysis of the systems of Volterra equations, it is possible to construct system criteria for controlling and predicting the corresponding processes and phenomena. To move to spatial problems, it is necessary to introduce the corresponding transport and diffusion coefficients into the systems of equations of Volterra and Lotka-Volterra. In this case, these equations can also be considered as systems of nonlinear diffusion equations. A list of problems for which it is expedient to use such a formalism is given.

Key words: dynamical processes, Volterra, Lotka, adiabatic exclusion, diffusion expansion, population problems, nonlinear dynamics.

Петро ТРОХИМЧУК

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2737-0506>

SCOPUS AUTHOR ID: 8383601100

Владислав САХАН

аспірант кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Волинська область, Україна, 43025

Бібліографічний опис статті: Трохимчук, П., Сахан, В. (2025). Системи кінетичних рівнянь Вольтерра та Лотки-Вольтерра та їх розширення та застосування. *Фізика та освітні технології*, 1, 101–107, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-13>

СИСТЕМИ КІНЕТИЧНИХ РІВНЯНЬ ВОЛЬТЕРРА ТА ЛОТКИ-ВОЛЬТЕРРА ТА ЇХ РОЗШИРЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ

Наводиться системний аналіз систем кінетичних рівнянь Вольтерри та Лотка-Вольтерри. Наводяться популяційні задачі, які необхідно було розв'язати, та короткий їх аналіз. До цих задач відносяться демографічні, екологічні та т. п. проблеми. З понятійної точки зору ці задачі розбиваються на дві типи: задача про два види, що їдять одну їжу (рівняння Вольтерри) та задача хижак-жертва (рівняння Лотка-Вольтерри). Перша задача виникла з проблеми роозцмноження кроликів в Австралії.

Окрім того,, в тій же популяційній біології виникла задача, коли один вид поїдає інший (хижак і жертва) Ця задача розв'язувалась багатьма дослідниками в галузі біології та медицини, зокрема вірусології. Її частинний розв'язок наведений в книзі А. Лотки, а більш загальний в лекціях В. Вольтерри. Через це ці рівняння інколи називають рівняння Лотка-Вольтерри. Як і в першій, так і в другій задачі необхідно, щоб було достатньо ресурсу (їжі) для стаціонарного стабільного існування та розвитку динамічної системи. Нами проведено аналіз проблем, які розв'язуються або які доцільно розв'язувати за допомогою цих методів. Також проаналізовані задачі з неоднорідною часвою ієрархією процесів. Показано, що для розв'язання таких задач доцільно використовувати мето адіабатичного виключення змінних. Цей метод був використаний для розв'язання кінетичних проблем в релаксаційній оптиці.

Ці рівняння доцільно використовувати тоді, коли є декілька конкуруючих синфазних процесів. На основі загального аналізу систем рівнянь Вольтерри можна побудувати системні критерії управління та прогнозування відповідних процесів та явищ. Для переходу до просторових задач в системи рівнянь Вольтерри та Лотка-Вольтерри потрібно ввести відповідні коефіцієнти переносу та дифузії. В цьому випадку ці рівняння можна також розглядати як системи нелінійних рівнянь дифузії. Наводиться перелік задач для яких доцільно використовувати такий формалізм.

Ключові слова: динамічні процеси, Вольтерра, Лотка, адіабатичне виключення, дифузійне розширення, популяційні проблеми, нелінійна динаміка.

Introduction

For modeling dynamic (chronological) processes, it is advisable to use the formalism of V. Volterra's kinetic equation systems (Volterra, 1931). These equations should be used when there are several competing in-phase processes. Based on the general analysis of Volterra's equation systems, it is possible to construct systemic criteria for controlling and predicting the corresponding processes and phenomena (Baca e r, 2008).

Let us present the simplest system of two equations. Depending on the conditions of the problem, we will consider and analyze problems of four types: the problem of two species eating the same food (Volterra, 1931); the predator-prey problem (Volterra, 1931); the problem with adiabatic elimination (Trokhimchuck, 2020) of a variable and the problem with diffusion expansionm (Trokhimchuck, 2020).

It is shown that the method of aliabatic elimination of variables is one of the main methods of the theory of dissipative structures (Glansdorff, 1971) and synergetics (Haken, 1977).

The problem of diffusion instability for systems of autonomous equations with the addition

of diffusion terms is investigated. In general, in a particular case, this can be considered as a diffusion extension of the Volterra equations (Trokhimchuck, 2020). The analysis is carried out for a system of two equations.

The feasibility of using these methods to describe various evolutionary dynamic processes of the population type is shown (Trokhimchuck, 2020).

Two species eating the same food

In the second half of the XIXth century, the problem of rabbits arose in Australia, which proved to be worthy competitors for farmers. And now their number fluctuates between 0.6 and 0.7 billion. This problem was first solved by Vito Volterra and published at the end of the 19th century in the journal *Acta matematika*, published in Stockholm by Mittag-Leffler (Trokhimchuck, 2020). Later, it was included in his course of lectures, which were read at the Sorbonne and published in French (Volterra, 1931).

Consider the problem of two species consuming the same food (Volterra, 1931).

Suppose that with an amount of food sufficient to fully satisfy the species under consideration,

there are constant positive growth coefficients $\varepsilon_1, \varepsilon_2$. In a real situation, when these species live in a limited area, food will decrease with increasing numbers N_1 and N_2 (which mean the number of species). This will lead to a decrease in the values of the growth coefficients. If the amount of food eaten per unit time is represented by the function $F(N_1, N_2)$, it turns into zero simultaneously with the sum $N_1 + N_2$ and monotonically approaches ∞ together with each of these variables, then it is natural to take the expressions as growth coefficients

$$\varepsilon_1 - \gamma_1 F(N_1, N_2), \varepsilon_2 - \gamma_2 F(N_1, N_2), \quad (1)$$

where γ_1, γ_2 – positive constants corresponding to the food requirements of each of the two species.

From here we obtain a system of differential equations that describe the development of both species (Volterra, 1931):

$$\frac{dN_1}{dt} = [\varepsilon_1 - \gamma_1 F(N_1, N_2)] N_1, \quad (2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = [\varepsilon_2 - \gamma_2 F(N_1, N_2)] N_2. \quad (3)$$

Now the mathematical problem arises of studying the solutions N_1, N_2 of this system for initial values N_1^0, N_2^0 , positive for $t = t_0$.

It can be proved that for any finite time interval (t_0, T) there is a unique solution of two continuous functions, which are placed between two positive numbers, of which no longer depends on the end of the interval T (i.e. N_1, N_2 remain bounded).

Let us consider what happens with an unlimited increase in time. Rewriting (2) and (3) in the form

$$\frac{d \log N_1}{dt} = \varepsilon_1 - \gamma_1 F(N_1, N_2), \quad (2a)$$

$$\frac{d \log N_2}{dt} = \varepsilon_2 - \gamma_2 F(N_1, N_2), \quad (3a)$$

we get

$$\gamma_2 \frac{d \log N_1}{dt} - \gamma_1 \frac{d \log N_2}{dt} = \varepsilon_1 \gamma_2 - \varepsilon_2 \gamma_1, \quad (4)$$

and then

$$\frac{N_1^{\gamma_2}}{N_2^{\gamma_1}} = \frac{(N_1^0)^{\gamma_2}}{(N_2^0)^{\gamma_1}} e^{(\varepsilon_1 \gamma_2 - \varepsilon_2 \gamma_1)(t - t_0)}, \quad (5)$$

We neglect the almost improbable case when

$$\varepsilon_1 \gamma_2 - \varepsilon_2 \gamma_1 = 0, \quad (6)$$

and suppose (changing the types if necessary) that

$$\varepsilon_1 \gamma_2 - \varepsilon_2 \gamma_1 > 0 \text{ або } \frac{\varepsilon_1}{\gamma_1} > \frac{\varepsilon_2}{\gamma_2}; \quad (7)$$

Then according to (5) we have

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{N_1^{\gamma_2}}{N_2^{\gamma_1}} = +\infty. \quad (8)$$

Since N_1 is bounded, N_2 tends to zero.

Thus, we can conclude that the second species, in which ε/γ has a smaller value, will decrease and eventually disappear, while the first one continues to exist (Volterra, 1931).

Two species, one of which eats the other (predator and prey)

This problem has been solved by many researchers in the field of biology and medicine, in particular virology. Its partial solution is given in the book of A. Lotka (Lotka, 1925), and a more general one in the lectures of V. Volterra (Volterra, 1931). Because of this, these equations are sometimes called the Lotka-Volterra equations (Trokhimchuk, 2020).

If only one of them, namely the prey, were present in the environment where these species live, then it would have a certain growth coefficient ε_1 , which we will assume to be constant and positive. The second species (predator), which feeds only (or mainly) on the prey, assuming that it exists in isolation, has a certain growth coefficient $-\varepsilon_2$, which we will assume to be constant and negative. When such two species exist in a limited environment, the first will develop the slower the more individuals of the second species exist, and the second – the faster the more numerous the first species is. The hypothesis, quite simple, is that the growth rates are equal to, respectively

$$\varepsilon_1 - \gamma_1 N_2 \text{ і } -\varepsilon_2 + \gamma_2 N_1 \quad (9)$$

(γ_1, γ_2 are positive constants). This leads to a system of differential equations for describing the number of species [26]:

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= (\varepsilon_1 - \gamma_1 N_2) N_1, \\ \frac{dN_2}{dt} &= -(\varepsilon_2 - \gamma_2 N_1) N_2, \end{aligned} \quad (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_1, \gamma_2 > 0). \quad (10)$$

We will arrive at the same result with a less crude study of the interaction of species, reasoning as follows (Volterra, 1931).

Let us consider the more general case of two species, which, existing separately, have growth coefficients λ_1, λ_2 , the signs of which are not specified.

In the case of coexistence of these species, we will assume that the meetings of individuals of different species (the number of these meetings per unit of time is equal to $\alpha N_1 N_2$, where $\alpha = const$) somehow affect the number of species. Algebraically, this effect is expressed by the increments β_1 and β_2 of the number of individuals corresponding to n meetings (n is a fixed, sufficiently large number). We will assume that these increments occur immediately, without delay. Then, over time dt , the species increase by

$$dN_1 = \lambda_1 N_1 dt + \alpha N_1 N_2 \frac{\beta_1}{n} dt,$$

$$dN_2 = \lambda_2 N_2 dt + \alpha N_1 N_2 \frac{\beta_2}{n} dt,$$

Thus, we obtain a system of differential equations (Volterra, 1931):

$$\begin{aligned}\frac{dN_1}{dt} &= N_1(\lambda_1 + \mu_1 N_2), \\ \frac{dN_2}{dt} &= N_2(\lambda_2 + \mu_2 N_1),\end{aligned}\tag{11}$$

where

$$\mu_1 = \alpha \frac{\beta_1}{n} \quad \mu_2 = \alpha \frac{\beta_2}{n}. \quad (12)$$

Since encounters are beneficial for predators and detrimental for prey, in the case we will consider first,

$$\lambda_1 > 0, \lambda_2 < 0, \quad \mu_1 \langle 0, \mu_2 \rangle 0. \quad (13)$$

Therefore, equations (11) takes the form (10) (Volterra, 1931).

From equations (11) we obtain for any case (assuming $N_1 > 0, N_2 > 0$)

$$\mu_2 \frac{dN_1}{dt} - \mu_1 \frac{dN_2}{dt} = \mu_2 \lambda_1 N_1 - \mu_1 \lambda_2 N_2, \quad (14)$$

$$\lambda_2 \frac{dN_1}{N_1} - \lambda_1 \frac{dN_2}{N_2} = \mu_2 \lambda_1 N_1 - \mu_1 \lambda_2 N_2, \quad (15)$$

where

$$\mu_2 \frac{dN_1}{dt} + \lambda_2 \frac{dN_1}{N_1} - \mu_1 \frac{dN_2}{dt} - \lambda_1 \frac{dN_2}{N_2} = 0. \quad (16)$$

Integrating, we obtain [26]

$$\mu_2 N_1 + \lambda_2 \log N_1 - (\mu_1 N_2 + \lambda_1 \log N_2) = const, \quad (17)$$

or

$$N_1^{\lambda_2} e^{\mu_2 N_1} = C N_2^{\lambda_1} e^{\mu_1 N_2}. \quad (18)$$

Let us construct the curve (18) in the plane (N_1, N_2) .

Let us return to the case of predator and prey considered above, when

$$\lambda_1 = \varepsilon_1 > 0, \lambda_2 = -\varepsilon_2 < 0, \mu_1 = -\gamma_1 \langle 0, \mu_2 = \gamma_2 \rangle 0. \quad (19)$$

To construct this curve, we will draw auxiliary curves

$$(L_1) \quad Y = N_1^{-\varepsilon_2} e^{\gamma_2 N_1}, \quad (20)$$

$$(L_2) \quad C = N_2^{\varepsilon_1} e^{\gamma_1 N_2}, \quad (21)$$

and draw the desired curve based on the relation

$$Y = CX. \quad (22)$$

On two perpendicular lines, we mark the axes Ox, ON_1 and iOy, ON_2 (Fig. 1), in the second and fourth quadrants we draw auxiliary curves L_1 and L_2 .

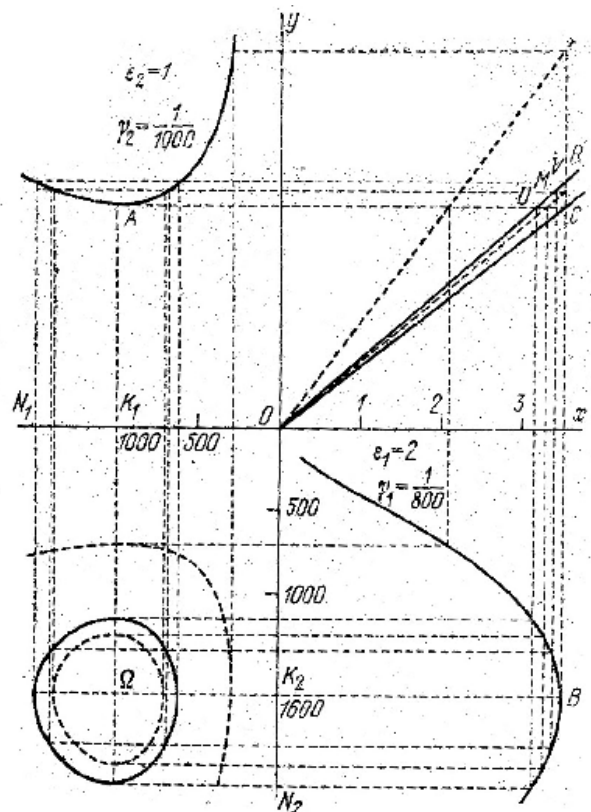


Fig. 1. Phase portraits of the predator-prey problem (Volterra, 1931)

In practice, this curve is a phase portrait of the “predator-prey” problem, on the basis of which we can consider and analyze various scenarios of this problem (Svidzinskii, 2009).

Adiabatic elimination of variables method

If in the system of equations

$$\dot{\vec{x}} = f(\vec{x}, \vec{u}, \vec{\xi}, t) \quad (23)$$

the right-hand side does not depend explicitly on time, i.e. $\dot{\vec{x}} = f(\vec{x}, \vec{u}, \vec{\xi})$, then such a system of equations is called *autonomous* or *self-organized (self-controlled)* (Trokhimchuck, 2020). Here $\vec{x}$ is a deterministic phase vector, $\vec{u}$ is a vector of control parameters, $\vec{\xi}$ is a vector of stochastic parameters.

The most developed is the system of two nonlinear equations of the first order (on the plane) (Trokhimchuck (2020)). It can always be represented as a Hamiltonian system and the entire arsenal of mathematical methods developed in this area can be applied.

Let us write the system of two equations in the following form:

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2), \quad \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2). \quad (24)$$

System (24) will be non-autonomous if $\frac{\partial f_n}{\partial x} \neq 0$.

Let us consider the case when the variables x_1 and x_2 describe two different subsystems, slow and fast in time variation. For this case, equation (24) takes the form

$$\dot{x}_1 = k_{11} + F_1(x_1, x_2), \quad \dot{x}_2 = -\gamma x_2 + F_2(x_1, x_2), \quad (25)$$

where $\gamma > 0$, $\gamma \gg |k_{11}|$. The evolution of a fast subsystem begins with a transient process of duration $\tau_2 \sim \gamma^{-1} \ll \tau_1 \sim |k_{11}^{-1}|$. Further, the evolution of the system is described by equations (8.2), in which we can put $\dot{x}_2 = 0$:

$$\dot{x}_1 = k_{11} + F_1(x_1, x_2), \quad 0 = -\gamma x_2 + F_2(x_1, x_2), \quad (25a)$$

From the second equation we find $x_2 = \varphi(x_1)$. Substitution x_2 into the first equation allows us to significantly simplify the problem:

$$\dot{x}_1 = k_{11} + F_1(x_1, \varphi(x_1)). \quad (26)$$

This method, based on the selection of characteristic time scales, is called *adiabatic elimination of the variable x_2* . This approach was first proposed by G. Haken (Haken, 1977). It can be concluded that the behavior of the system is determined by the evolution of the slow subsystem. The slow subsystem controls the fast one. That is why the variable x_1 is called *the order parameter*.

In multidimensional systems, a small number of slow variables can be distinguished, to which all the others are adjusted. Moreover, in many

cases, it is possible to obtain solutions of the form $x_n(t) = F(t, \psi(\zeta_n))$, $\zeta_n = n/at$, $n \in (1, s)$. Such solutions are called self-similar, or self-similar. The evolution of the system is characterized by “forgetting” the initial conditions and the formation of structures determined by functions $\psi(\zeta_n)$. Simple structures are combined into various types of complex structures, to which the eigenvectors of a nonlinear system of equations can be compared. Such solutions cannot exist in the vicinity of the equilibrium state, since the dissipative process associated with the dissipation of energy destroys any order. New coherent structures arise in states far from equilibrium in open systems and are stabilized as a result of energy exchange with the environment. Thus, nonequilibrium can be a source of order, or self-organization. I. Prigozhin called such *order a dissipative structure* (Glansdorff, 1971). The phenomena of self-organization are inherent in hydrodynamics, chemistry, biology, astrophysics, ecology, economics, sociology. G. Haken proposed to call this part of the theory of control *synergetics* (literally – *the theory of joint action*) (Haken, 1977).

Since the systems of Volterra equations are autonomous equations, it is advisable to use the Haken procedure for them. Therefore, this method was tested for the system of three Volterra equations to describe the processes of Relaxed Optics (Trokhimchuck, 2008).

Diffusion instability

Let us move on to a more complex example – a two-component system of the form:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial t} &= f_1(u_1, u_2) + D_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2}, \\ \frac{\partial u_2}{\partial t} &= f_2(u_1, u_2) + D_2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2}. \end{aligned} \quad (27)$$

Where D_1 and D_2 are the diffusion coefficients. When $D_1 = D_2 = 0$, the system (27) reduces to a system (24) (Trokhimchuck, 2020). Therefore, system (27) may be represented as Volterra system with diffusion expansion too. Adding spatial derivatives, i.e. “turning on” the diffusion coupling of point elements, can radically change the properties of the system. Let us begin traditionally with finding and investigating the stability of the homogeneity of stationary states. According to (27), these states are determined from the system of equations

$$f_1(u_1, u_2) = 0, \quad f_2(u_1, u_2) = 0. \quad (28)$$

Let $u_1 = u_1^{(0)}$ and $u_2 = u_2^{(0)}$ are some solutions of the system (28). To investigate the stability of these solutions, we write

$$u_1(x, t) = u_1^{(0)} + w_1(x, t), \quad u_2(x, t) = u_2^{(0)} + w_2(x, t). \quad (29)$$

Substituting (29) into (27) and linearizing the resulting equations by small additions w_1 and w_2 , we obtain a system of two linear partial differential equations with constant coefficients

$$\begin{aligned} \frac{\partial w_1}{\partial t} &= f_{11}w_1 + f_{12}w_2 + D_1 \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2}, \\ \frac{\partial w_2}{\partial t} &= f_{21}w_1 + f_{22}w_2 + D_2 \frac{\partial^2 w_2}{\partial x^2}, \end{aligned} \quad (30)$$

where the derivatives $f_{ik} = \frac{\partial f_i}{\partial u_k}$ are calculated at $u = u^{(0)}$ the solution of system (30) is sought in the standard form

$$w_k(x, t) = \bar{w}_k \exp(pt + iqx), \quad k = 1, 2. \quad (31)$$

Substituting (31) into (30) gives the dispersion equation

$$\begin{aligned} p^2 - [\bar{f}_{11}(q) + \bar{f}_{22}(q)]p + \bar{f}_{11}(q) \cdot \\ \cdot \bar{f}_{22}(q) - \bar{f}_{12}(q) \cdot \bar{f}_{21}(q) = 0, \end{aligned} \quad (32)$$

where $\bar{f}_{11}(q) = f_{11} - q^2 D_1$, $\bar{f}_{22}(q) = f_{22} - q^2 D_2$. We emphasize that at $q = 0$ the dispersion equation (32) coincides with the dispersion equation for the corresponding point subsystem. In other words, the values of the functions $p(q)$, determined by equation (32), at $q = 0$ coincide with the Lyapunov exponents of the linearized point system (Trokhimchuck, 2020).

Analysis of the dispersion equation (32) shows that the solutions of equation (27) $u_1 = u_1^{(0)}$ and $u_2 = u_2^{(0)}$, which are stable in the absence of transport processes, i.e., at $D_1 = D_2 = 0$, may lose stability when diffusion is “turned on” (Trokhimchuck,

2020). From the point of view of the dispersion equation, this means that, although at $q = 0$ both of its roots are negative ($p_1(0) < 0$ and $p_2(0) < 0$), there is an interval of values of q in which at least one of the roots has a positive real part. The conditions for the existence of such an interval follow from equation (32). They are written in the form (Trokhimchuck, 2020)

$$\begin{cases} 1) f_{11} \cdot f_{22} - f_{12} \cdot f_{21} < 0, \\ 2) f_{11} \cdot D_2 - f_{22} \cdot D_1 > 0, \\ 3) (f_{11} \cdot D_2 + f_{22} \cdot D_1)^2 > 4D_1 \cdot D_2 (f_{11} \cdot f_{22} - f_{12} \cdot f_{21}), \\ 4) f_{11} + f_{22} < 0. \end{cases} \quad (33)$$

From the above it follows that the occurrence of instability is due to the presence of transport processes. Therefore, such instability is called diffusion instability. Its important feature is the requirement of the difference of diffusion coefficients:

$$D_1 \neq D_2, \quad (34)$$

which follows from the comparison of the second and fourth inequalities in (33). Fig. 12 shows the dispersion curves $p_{1,2}(q)$ for the cases of absence and presence of diffusion instability.

Conclusions

1. The systems of Volterra and Lotka-Volterra kinetic equations and their extensions are analyzed.

2. The problem of two species eating the same food is investigated. The conditions for the survival of one of the species are formulated.

3. The “predator-prey” problem is discussed. It is shown that for its analysis it is worth using the method of phase diagrams.

4. The problem of adiabatic elimination of variables for systems of autonomous differential equations is analyzed. It is shown that this procedure is also successfully used for systems of Volterra kinetic equations.

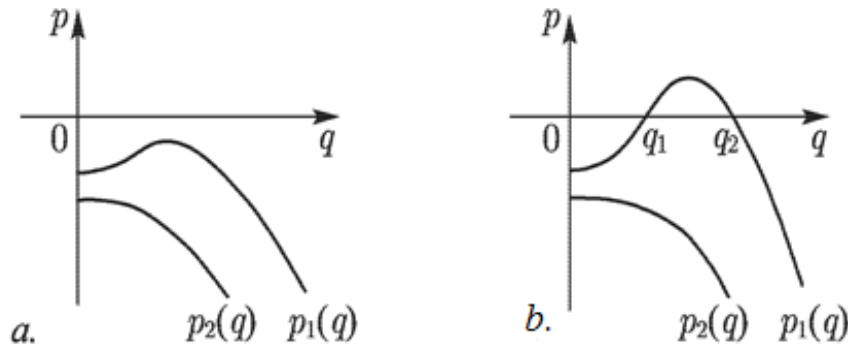


Fig. 2. Spectral functions $p(q)$, given by the dispersion equation (14.71), for the stable (a) and unstable (b) homogeneous state (Trokhimchuck, 2020)

5. The problem of diffusion instability for systems of autonomous equations with the addition of diffusion terms is investigated. In general, in a particular case, this can be considered as a diffusion extension of the Volterra equations.

BIBLIOGRAPHY:

1. Bacaër N. Histoires de mathématiques et de populations. Paris : Cassini, 2008. 211p.
2. Glandsdorff P., Prigogine, I. Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations. New York: Wiley-Interscience, 1971. 306 p.
3. Haken H. Synergetics. An Introduction. Nonequilibrium phase transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology. Berlin a.o.: Springer-Verlag, 1977. 325 p.
4. Lotka A.J. Elements of Physical Biology. Baltimore: Williams & Wilkins, 1925. 460 p.
5. Свідзинський А. В. Математичні методи теоретичної фізики. Т.1. Київ: Ін-т теорет. фізики, 2009. 396 с.
6. Trokhimchuk P.P. About application kinetic Volterra equations and Haken method for the hierarchic dynamical processes modeling. Management systems and information technologies, № 2(28), 2008. С. 23–27.
7. Трохимчук П. П. Математичні основи знань. Поліметричний підхід. 2-е вид. Луцьк : Вежа-Друк, 2014. 624 с.
8. Трохимчук П. П. Нелінійні динамічні системи. 2-е вид. Луцьк : Вежа-Друк, 2014. 316 с.
9. Trokhimchuk P. P. Theories of Everything: Past, Present, Future. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2021. 260 p.
10. Volterra V. Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la vie. Paris:Gauthiers-Villars, 1931. 214 p.

REFERENCES:

1. Bacaër, N. (2008). Histoires de mathématiques et de populations. Paris: Cassini, 211 p.
2. Glandsdorff, P., & Prigogine, I. (1971). Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations. New York: Wiley-Interscience, 306 p.
3. Haken, H. (1977). Synergetics. An Introduction. Nonequilibrium phase transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology. Berlin a.o.: Springer-Verlag, 325 p.
4. Lotka, A.J. (1925). Elements of Physical Biology. Baltimore: Williams & Wilkins, 460 p.
5. Svidzinskii, A. V. (2009). Matematychni metody teoretychnoyi fizyky [Mathematical methods of theoretical physics], vol. 1. Kyiv: Institute of theoretical physics, 396 p.
6. Trokhimchuk, P. P. (2008). *About application kinetic Volterra equations and Haken method for the hierarchic dynamical processes modeling*. Management systems and information technologies, 2(28), pp. 23–27.
7. Trokhimchuk, P. P. (2014). Matematychni osnovy znan'. Polimetrychnyy pidkhid [Mathematical foundations of knowledge. Polymetrical doctrine]. 2-d ed. Lutsk: Vezha-Print, 624 p. [in Ukrainian]
8. Trokhimchuk, P. P. (2014). Neliniyni dynamichni systemy [Nonlinear dynamical systems]. 2-d ed. Lutsk: Vezha-Print, 316 p. [in Ukrainian]
9. Trokhimchuk, P. P. (2021). Theories of Everything: Past, Present, Future. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 260 p.
10. Volterra, V. (1931). Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la vie. Paris: Gauthiers-Villars, 214 p.

УДК 538.9

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-14>

Олексій НОВОСАД

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9433-7776>

SCOPUS ID: 55595635700

Олег ШИГОРІН

аспірант навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-6679-1115>

Хадж Каддур БЕЛЛАГРА

аспірант кафедри неорганічної та фізичної хімії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

Людмила ПІСКАЧ

кандидат хімічних наук, професор кафедри неорганічної та фізичної хімії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3117-4006>

SCOPUS ID: 6603765788

Віктор ГОМІЛКО

здобувач освіти навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

Бібліографічний опис статті: Новосад, О., Шигорін, О., Беллагра, Х. К., Піскач, Л., Гомілко, В. (2025). Термоелектричні та оптичні властивості кристалів твердих розчинів по перерізу $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}\text{-Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$. *Фізика та освітні технології*, 1, 108–113, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-14>

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ТА ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КРИСТАЛІВ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ ПО ПЕРЕРІЗУ $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}\text{-Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$

У роботі представлені результати досліджень термоелектричних та оптичних властивостей кристалів по перерізу $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}\text{-Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ із вмістом 10, 20, 30 мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$.

Мета роботи полягала в експериментальному визначенні питомої електропровідності, типу провідності, коефіцієнта Зеебека, оцінці ширини забороненої зони та розрахунку термоелектричної потужності кристалів твердих розчинів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}\text{-Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$. Усі дослідження проводились при кімнатній температурі ($T \approx 300$ K). Найвищими значення питомої електропровідності ($\approx 170 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$) володіли зразки твердих розчинів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}\text{-Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ з 20 мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$. Високі значення σ можуть свідчити про стан матеріалів, близький до вродженого. Термоелектричними методами встановлено, що кристали $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}\text{-Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ належать до напівпровідників n-типу провідності. Значення коефіцієнтів Зеебека становили 205 мкВ/К, 220 мкВ/К, 240 мкВ/К для кристалів твердих розчинів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}\text{-Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ з 10, 20 та 30 мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$. Маючи високі значення коефіцієнта Зеебека, кристали твердих розчинів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}\text{-Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ є перспективними матеріалами для виготовлення чутливих термодатчиків. Встановлено, що найвищі значення термоелектричної потужності ($\alpha^2 \cdot \sigma = 8,2 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/м} \cdot \text{К}^2$) властиві кристалам $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}\text{-Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ з вмістом 20 мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$.

Для оцінки ширини забороненої зони досліджено спектральний розподіл коефіцієнта поглинання світла в області краю фундаментального поглинання. Оцінені із спектрів оптичного поглинання значення ширини забороненої зони становили 1,89 eВ, 1,92 eВ, 1,95 eВ для кристалів твердих розчинів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}\text{-Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ з вмістом 10, 20 та 30 мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$. Встановлено, що досліджувані кристали є непрямозонними.

Ключові слова: напівпровідники, кристали, коефіцієнт Зеебека, оптичне поглинання, ширина забороненої зони.

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, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9433-7776>

SCOPUS AUTHOR ID: 55595635700

Oleg SHYGORIN

Postgraduate 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: <https://orcid.org/0009-0007-6679-1115>

Hadj Kaddur BELLAGRA

Postgraduate Student at the Department of Inorganic and Physical Chemistry, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

Lyudmyla PISKACH

Candidate of Chemical Sciences, Professor at the Department of Inorganic and Physical Chemistry of the Faculty of Chemistry and Ecology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3117-4006>

SCOPUS ID: 6603765788

Victor GOMILKO

Student at the Educational and Scientific Physical and Technological Institute, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

To cite this article: Novosad, O., Shygorin, O., Bellagra, H. K., Piskach, L., Gomilko, V. (2025). Termoelektrychni ta optychni vlastyivosti krystaliv tverdykh rozchyniv po pererizu $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ - $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ [Thermoelectric and optical properties of solid solution crystals across the $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ - $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ section]. *Physics and Educational Technology*, 1, 108–113, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-14>

THERMOELECTRIC AND OPTICAL PROPERTIES OF SOLID SOLUTION CRYSTALS ACROSS THE $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ - $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ SECTION

The paper presents the results of studies on the thermoelectric and optical properties of $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ - $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ crystals. The $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ - $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ crystals corresponded to the compositional content of 10, 20, and 30 mol.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$.

The aim of the study was to experimentally determine the specific electrical conductivity, conductivity type, Seebeck coefficient, estimate the band gap width, and calculate the thermoelectric power of $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ - $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ crystals. All studies were conducted at room temperature ($T \approx 300$ K). The highest values of specific electrical conductivity ($\sigma \approx 170 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) were observed in $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ - $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ crystals with a 20 mol.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ content. High values of σ may indicate that the materials are in a state close to degeneracy. Thermoelectric methods have established that $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ - $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ crystals belong to n-type semiconductors. The Seebeck coefficient values were 205 $\mu\text{V/K}$, 220 $\mu\text{V/K}$, and 240 $\mu\text{V/K}$ for $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ - $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ crystals with 10, 20, and 30 mol.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ content, respectively. Having high Seebeck coefficient values, $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ - $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ compounds are promising materials for the fabrication of sensitive thermal sensors. It has been established that the highest values of thermoelectric power ($\alpha^2 \cdot \sigma = 8.2 \times 10^{-6} \text{ W/m} \cdot \text{K}^2$) are characteristic of $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ - $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ crystals with a 20 mol.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ content.

To estimate the band gap width, light absorption spectra were studied in the region of the fundamental absorption edge. The band gap values estimated from the optical absorption spectra were 1.89 eV, 1.92 eV, and 1.95 eV for $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ - $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ solid solutions with 10, 20, and 30 mol.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$, respectively. It was established that the investigated crystals are indirect band gap semiconductors.

Key words: semiconductors, crystals, Seebeck coefficient, optical absorption, band gap.

Актуальність проблеми. Сполуки складів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}(\text{Se})_{12}$ утворюються у квазіпотрійних системах $\text{PbS}(\text{Se})\text{--Ga}_2\text{S}(\text{Se})_3\text{--GeS}(\text{Se})_2$ при співвідношенні вихідних компонентів 4:2:1 (Bellagra, 2020; Bellagra, 2023). Кристали цих сполук мають низку унікальних фізичних та хімічних властивостей, що робить їх перспективними для застосування в різних галузях напівпровідникової електроніки. Так, сполуки $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}(\text{S})_{12}$ мають перспективи використання в нелінійній оптиці (Chen, 2013). Завдяки високим значенням термоелектричної добротності (ZT) халькогенідів свинцю $\text{PbSe}(\text{S})$ (Rowe, 1995; Freik, 2013; Novosad, 2021), кристали $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}(\text{S})_{12}$ та тверді розчини на їх основі можуть стати перспективними для розробки термоелектричних генераторів у високотемпературному інтервалі. Їх можна використовувати як матеріали для детекторів ІЧ-випромінювання – завдяки прозорості в середньому ІЧ-діапазоні (Chen, 2013). Тобто сполуки $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ та $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ та тверді розчини на їх основі – $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}\text{--Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ є перспективними для досліджень у галузі новітніх матеріалів, оскільки вони поєднують властивості декількох класів матеріалів: класичних напівпровідників, нелінійно-оптичних матеріалів та матеріалів для термоелектричної генерації.

Робота присвячена дослідженню оптичних та термоелектричних властивостей кристалів твердих розчинів по перерізу $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}\text{--Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ з вмістом 10, 20, 30 мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі (Chen, 2013) авторами було синтезовано сполуки $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ та $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$, досліджено їх кристалічну структуру та деякі оптичні властивості. На основі досліджень оптичних властивостей (Chen, 2013) оцінені значення ширини забороненої зони даних сполук, вони виявились рівними 1,91 eV та 2,35 eV для $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ та $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ відповідно. Також показано, що дані матеріали мають широкі області прозорості в середньому ІЧ-діапазоні 0,80 мкм – 22,5 мкм та 0,75 мкм – 22,5 мкм для $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ та $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ відповідно, та є перспективними матеріалами для нелінійної оптики.

У роботах (Bellagra, 2020; Myronchuk, 2025) показано, що кристали $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ та

$\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ є непрямоzonними напівпровідниками та розрахована їх зонна структура. На основі досліджень спектрального розподілу коефіцієнта поглинання світла оцінені значення ширини забороненої зони, отримані значення E_g добре узгоджуються з даними роботи (Chen, 2013).

Особливістю спектрального розподілу фотопровідності кристалів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ та $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ є наявність двох максимумів (Bellagra, 2020). Один із максимумів обумовлювався власною фотопровідністю, інший – домішковою. Енергетичне положення максимумів домішкової фотопровідності відповідало енергії квантів світла 1,20 eV і 0,92 eV для кристалів твердих розчинів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ і $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ відповідно.

Мета дослідження. Мета дослідження полягала в експериментальному визначенні питомої електропровідності, коефіцієнта Зеебека та дослідженні спектрального розподілу коефіцієнта поглинання світла кристалів твердих розчинів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}\text{--Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ із вмістом 10, 20, 30 мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$. На основі одержаних даних розрахувати термоелектричну потужність, оцінити значення ширини забороненої зони та проаналізувати залежність цих параметрів від компонентного складу кристалів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}\text{--Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$.

Методика та техніка експерименту. Зразки твердих розчинів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}\text{--Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ відповідали компонентному складу 10, 20, 30 мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$. Методика отримання кристалів та деякі фізичні властивості $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ та $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ представлені в роботах (Bellagra, 2020; Bellagra, 2023; Myronchuk, 2025). Для дослідження електричних та термоелектричних властивостей із отриманих злитків кристалів перерізу $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}\text{--Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ вирізались зразки у формі правильних паралелепіпедів. Середні розміри зразків становили $(6\text{--}3) \times (2\text{--}0,5) \times (2\text{--}0,5)$ мм³. Для вимірювань опору зразків використовували «Омметр цифровий ІЩ-34». Схема установки для визначення коефіцієнта Зеебека та типу провідності кристалів описана в (Novosad, 2022).

Для дослідження спектрів поглинання світла використовувалися кристалічні зразки з плоско-паралельними поверхнями оптичної якості товщиною $(0,1\text{--}0,15)$ мм. Поверхні зразків оброблялись шліфуванням та поліруванням алмазними пастами різної зернистості.

Дослідження спектрального розподілу коефіцієнта поглинання світла здійснювалося на установці, зібраній на основі монохроматора МДР-208. Оптичний сигнал фіксували датчиком на основі Si фотоприймача.

Виклад основного матеріалу дослідження. Термоелектричними методами встановлено, що зразки твердих розчинів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ – $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ з 10, 20, 30 мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ належать до напівпровідників *n*-типу провідності. Значення питомої електропровідності кристалів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ – $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$, при $T=300$ К, представлені в табл. 1. Високі значення питомої електропровідності можуть свідчити про те, що стан даних сполук, при кімнатних температурах, є близьким до виродженого.

З даних, представлених в табл. 1., видно, що збільшення вмісту другої компоненти в твердих розчинах $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ – $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ призводить до плавного зростання коефіцієнта Зеебека. Маючи високі значення коефіцієнта Зеебека, досліджувані кристали можна використовувати для розробки термодатчиків. Відомо, що ефективність роботи термоелектрогенератора визначається термоелектричною добротністю використаних у ньому матеріалів, яка визначається формулою (Macia, 2015; Rowe, 1995):

$$Z \cdot T = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\chi_{tot}} \cdot T,$$

де $Z \cdot T$ – термоелектрична добротність матеріалу, α – коефіцієнт Зеебека, σ – питома електропровідність, χ_{tot} – коефіцієнт теплопровідності, T – абсолютна температура.

У попередній формулі величину $\alpha^2 \cdot \sigma$ називають термоелектричною потужністю матеріалу. Числові значення $\alpha^2 \cdot \sigma$ для твердих розчинів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ – $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ представлені в табл. 1. та на рис. 1. З рис. 1. видно, що найвищими значеннями $\alpha^2 \cdot \sigma$ володіють сполуки $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ – $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ з 20 мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$. З формули (1) видно,

що така поведінка $\alpha^2 \cdot \sigma$ для зразків з 20 мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ в значній мірі обумовлена зростанням σ . Слід відмітити, що важливим завданням залишається визначення χ_{tot} (Новосад, 2023), для досліджуваних кристалів.

Для оцінки значень E_g досліджувались спектральні розподіли коефіцієнта поглинання світла (рис. 2.). Із рис. 2. видно, що залежність коефіцієнта поглинання світла від енергії квантів світла добре спрямляється в координатах $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$, що свідчить про непрямі дозволені оптичні переходи. Для визначення E_g при непрямих дозволенних переходах прямолінійні ділянки екстраполювалися до $(\alpha h\nu)^{1/2} = 0$. Аналогічні результати були отримані для монокристалів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ та $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ (Bellagra, 2020; Myronchuk, 2025). Отримані таким чином значення E_g представлені в табл. 1 та на рис. 3. Значення E_g для кристалів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ взяті з робіт (Bellagra, 2020; Myronchuk, 2025).

На вставці рис. 2. показана залежність $\alpha = f(h\nu)$ для кристалів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ – $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ з 10 мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ в напівлогарифмічному масштабі. При енергії квантів світла менших за $\approx 2,2$ еВ залежність $\alpha = f(h\nu)$ описується прямою лінією в напівлогарифмічному масштабі (рис. 2). Аналогічні результати спостерігались і для зразків твердих розчинів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ – $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ з 20 та 30 мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$. Як слідує з рис. 2, залежність $\alpha = f(h\nu)$ добре описується правилом Урбаха (Studeniyak, 2014), що свідчить про участь хвостів щільності станів, обумовлених дефектністю кристалічної ґратки у формуванні оптичних переходів:

$$\alpha(\nu) \sim \exp\left(-\frac{E_{g0} - h\nu}{\Delta_0}\right),$$

де E_{g0} – константа, пропорційна ширині забороненої зони при 0 К; Δ_0 – характеристична енергія, яка визначає ступінь розмиття краю поглинання і є мірою розупорядкування (дефектності) кристалічної ґратки сполук.

Таблиця 1

Електричні, термоелектричні та оптичні параметри кристалів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ – $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$

мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$	Тип провідності	σ , (Ом·см) ⁻¹	α , мкВ/К	$\alpha^2\sigma$, 10 ⁻⁶ Вт/м·К ²	E_g , еВ
10	n	81	205	3,4	1,89
20	n	170	220	8,2	1,92
30	n	77	240	4,4	1,95

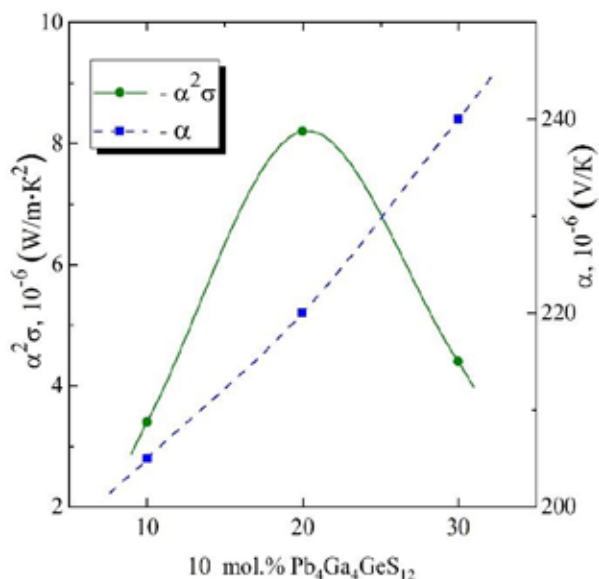


Рис. 1. Залежність термоелектричної потужності та коефіцієнта Зеебека кристалів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ – $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ від вмісту $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$

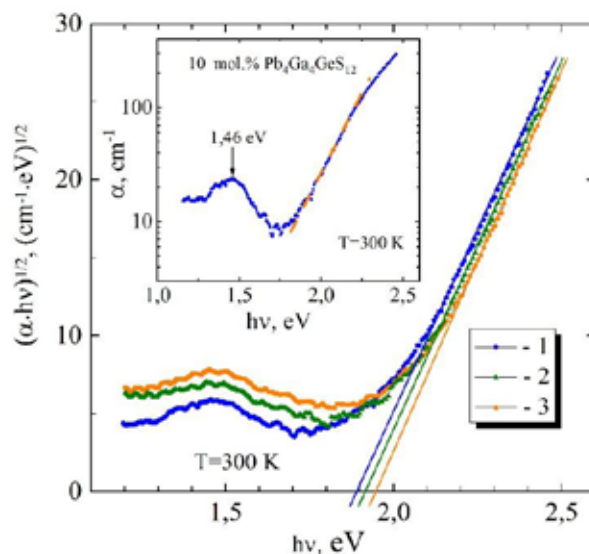


Рис. 2. Спектральний розподіл коефіцієнта поглинання світла кристалами $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ – $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ з: 1 – 10 мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$, 2 – 20 мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$, 3 – 30 мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$

На спектрах поглинання світла, при енергіях квантів світла $h\nu \approx 1,46$ eV, спостерігався максимум рис. 2. Така поведінка спектрального розподілу поглинання світла може обумовлюватись домішковим поглинанням. По нахилу залежності $\alpha=f(h\nu)$ (вставка на рис. 2) оцінені значення характеристичної енергії, вона Δ_0 . Великі значення $\Delta_0 \approx 140$ меВ свідчать про високу дефектність монокристалів твердих розчинів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ – $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Термоелектричними методами встановлено, що кристали $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ – $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ належать до напівпровідників *n*-типу провідності. Найвищі значення питомої електропровідності ($\sigma \approx 170$ Ом⁻¹·м⁻¹) мали кристали твердих розчинів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ – $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ з 20 мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$. Значення коефіцієнтів Зеебека становили 205 мкВ/К, 220 мкВ/К, 240 мкВ/К для твердих розчинів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ – $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ з вмістом 10, 20 та 30 мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$. Маючи високі значення коефіцієнта Зеебека, $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ – $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ є перспективними матеріалами для виготовлення чутливих термодатчиків. Найвищі значення термоелектричної потужності ($\alpha^2 \cdot \sigma = 8,2 \cdot 10^{-6}$ Вт/м²·К²) властиві кристалам твердих розчинів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ – $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ з вмістом 20 мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$. Про перспективність даних сполук

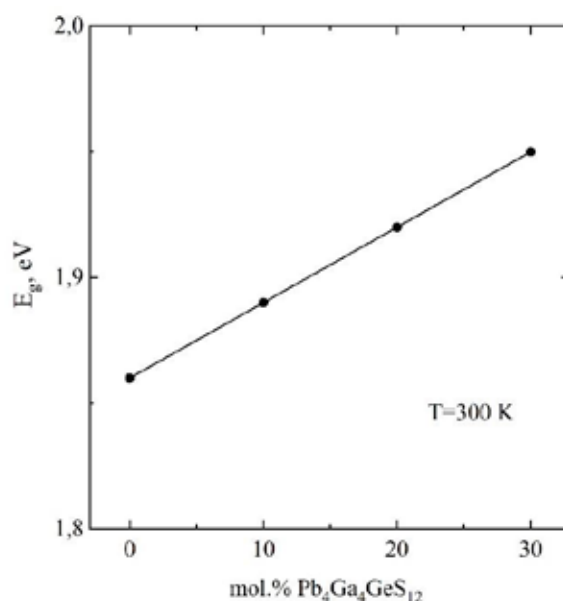


Рис. 3. Залежність ширини забороненої зони кристалів твердих розчинів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ – $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ від складу

як матеріалів для термоелектричної генерації можна буде стверджувати після досліджень їх коефіцієнта теплопровідності.

Оцінені із спектрів оптичного поглинання значення ширини забороненої зони становили 1,89 eV, 1,92 eV, 1,95 eV для зразків твердих розчинів $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$ – $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ з вмістом 10, 20 та 30 мол.% $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Bellagra H., Nyhmatullina O., Kogut Y., Myronchuk H., Piskach L. Photoconductivity of the Single Crystals $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ and $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MPDI) : Proceedings*. 2020. Vol. 62, № 1. P. 3–8. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020062004>
2. Bellagra H.K., Kogut Y.M., Piskach L.V. Component Interaction in the Quasi-Ternary System $\text{PbSe}-\text{Ga}_2\text{Se}_3-\text{GeSe}_2$. *J. Phase Equilib. Diffus.* 2023. V. 44. P. 3–16. <https://doi.org/10.1007/s11669-022-01017-9>
3. Chen, Y.K., Chen, M.C., Zhou, L.J., Chen, L., Wu, L.M. Syntheses, structures, and nonlinear optical properties of quaternary chalcogenides: $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeQ}_{12}$ (Q=S, Se). *Inorg. Chem.* 2013. Vol.52. P. 8334–8341. <https://doi.org/10.1021/ic400995z>
4. Rowe D. M. Handbook of thermoelectrics. New York : CRC Press, 1995. 720 pp.
5. Freik D.M., Nykyruy L.I., Dzumedzey R.O. et al. Thermoelectric Figure of Merit Optimization of PbX (X=S, Se, Te) Crystals. *Physics and chemistry of solid state*. 2013. vol. 14. P. 383–389.
6. 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. <https://doi.org/10.32782/pet-2021-1-7>
7. Myronchuk G. L., Nyhmatullina O., Rudysh M. Y. et al. Impact of Structural Defects on the Electronic and Optical Properties of $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{Ge}(\text{S},\text{Se})_{12}$ Crystals. *Physica B: Condensed Matter*. 2025. Vol. 699. P. 416834. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2024.416834>
8. Novosad O., Shygorin P., Bozhko V., Pishova P., Venhryn B., Goldun V. Electrical and Thermoelectrical Properties of $\text{PbSe}-\text{AgSbSe}_2$ 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. <https://doi.org/10.1109/TCSET55632.2022.9767085>
9. Enrique Macia. Thermoelectric Materials: Advances and Applications. CRC Press, 2015. 364 p.
10. Новосад О. Теплопровідність та термоелектрична добротність твердих розчинів $\text{CuIn}_3\text{S}_8-\text{CdIn}_2\text{S}_4$. *Фізика та освітні технології*, 2023. № 2. С. 30–35. <https://doi.org/10.32782/pet-2023-2-4>
11. Studenyak I., Kranjec M., Kurik M. Urbach Rule in Solid State Physics. *International Journal of Optics and Applications*. 2014. Vol.4. № 3. P. 76–83. <https://doi.org/10.5923/j.optics.20140403.02>

REFERENCES:

1. Bellagra, H., Nyhmatullina, O., Kogut, Y., Myronchuk, H., & Piskach, L. (2020). Photoconductivity of the Single Crystals $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ and $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}$. *Proceedings – Proceedings*, 62(1), 3–8. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020062004>.
2. Bellagra, H. K., Kogut, Y. M., & Piskach, L. V. (2023). Component Interaction in the Quasi-Ternary System $\text{PbSe}-\text{Ga}_2\text{Se}_3-\text{GeSe}_2$. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion – Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 44, 3–16. <https://doi.org/10.1007/s11669-022-01017-9>.
3. Chen, Y. K., Chen, M. C., Zhou, L. J., Chen, L., & Wu, L. M. (2013). Syntheses, structures, and nonlinear optical properties of quaternary chalcogenides: $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeQ}_{12}$ (Q = S, Se). *Inorganic Chemistry – Inorganic Chemistry*, 52, 8334–8341. <https://doi.org/10.1021/ic400995z>.
4. Rowe, D. M. (1995). *Handbook of thermoelectrics*. CRC Press.
5. Freik, D. M., Nykyruy, L. I., Dzumedzey, R. O., et al. (2013). Thermoelectric Figure of Merit Optimization of PbX (X = S, Se, Te) Crystals. *Physics and Chemistry of Solid State – Physics and Chemistry of Solid State*, 14, 383–389.
6. Novosad, O., Pishova, P., Bozhko, V., & Shpak, V. (2021). Termoelektrychna dobrotist monokystaliv $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$ [Thermoelectric figure of merit of $(\text{AgSb})_{1-x}\text{Pb}_x\text{Se}_2$ monocrystals]. *Fizyka ta osvritni tekhnolohii – Physics and Educational Technologies*, 1, 39–45. <https://doi.org/10.32782/pet-2021-1-7>.
7. Myronchuk, G. L., Nyhmatullina, O., Rudysh, M. Y., et al. (2025). Impact of Structural Defects on the Electronic and Optical Properties of $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{Ge}(\text{S},\text{Se})_{12}$ Crystals. *Physica B: Condensed Matter – Physica B: Condensed Matter*, 699, 416834. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2024.416834>.
8. Novosad, O., Shygorin, P., Bozhko, V., Pishova, P., Venhryn, B., & Goldun, V. (2022). Electrical and Thermoelectrical Properties of $\text{PbSe}-\text{AgSbSe}_2$ Monocrystals. *Proceedings of the 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering – Proceedings of the 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*, 798–801. <https://doi.org/10.1109/TCSET55632.2022.9767085>.
9. Macia, E. (2015). *Thermoelectric Materials: Advances and Applications*. CRC Press.
10. Novosad, O. (2023). Teploprovodnist ta termoelektrychna dobrotist tverdykh rozchyniv $\text{CuIn}_3\text{S}_8-\text{CdIn}_2\text{S}_4$ [Thermal conductivity and thermoelectric efficiency of $\text{CuIn}_3\text{S}_8-\text{CdIn}_2\text{S}_4$ solid solutions]. *Fizyka ta osvritni tekhnolohii – Physics and Educational Technologies*, 2, 30–35. <https://doi.org/10.32782/pet-2023-2-4> [in Ukrainian].
11. Studenyak, I., Kranjec, M., & Kurik, M. (2014). Urbach Rule in Solid State Physics. *International Journal of Optics and Applications – International Journal of Optics and Applications*, 4(3), 76–83. <https://doi.org/10.5923/j.optics.20140403.02>.

УДК 621.315.592

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-15>

Тетяна ЯЦИНЮК

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7288-3189>

SCOPUS AUTHOR ID: 57658704300

Володимир ГАЛЯН

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0066-7174>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422525700

Андрій КЕВШИН

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3581-8852>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422272900

Ганна ШАВАРОВА

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0251-9327>

SCOPUS AUTHOR ID: 6506685303

Володимир ГАЛЯН

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-0074-6576>

Бібліографічний опис статті: Яцинюк Т., Галян В., Кевшин А., Шаварова Г., Галян В. (2025) Оптичні термосенсори на основі склоподібних сплавів $\text{Er}_2\text{S}_3\text{-Ag}_{0,05}\text{Ga}_{0,05}\text{Ge}_{0,95}\text{S}_2$. *Фізика та освітні технології*, 1, 114–119, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-15>

ОПТИЧНІ ТЕРМОСЕНСОРИ НА ОСНОВІ СКЛОПОДІБНИХ СПЛАВІВ



Оптичні сенсори є однією із найперспективніших технологій у сучасній фізиці та хімії твердого тіла. З їх допомогою здійснюють точні вимірювання та контроль температури, рівня радіації, моніторинг забруднення різноманітних об'єктів без фізичного контакту. Застосування таких сенсорів значно розширює можливості в промисловому виробництві, медицині та екології. Актуальність дослідження оптичних сенсорів зростає із розвитком сучасних технологій і збільшенням вимог до точності, швидкості та безпеки вимірювань. Їх застосовують у галузях, де потрібна висока чутливість до зміни температури, тиску, вологості, концентрації газів і т.д.

Досліджено люмінесцентні властивості халькогенідних склоподібних сплавів перерізу $\text{Er}_2\text{S}_3\text{-Ag}_{0,05}\text{Ga}_{0,05}\text{Ge}_{0,95}\text{S}_2$ при 0,42 мол.% Er_2S_3 . Зафіксовано фотолюмінесценцію із максимумами випромінювання 660, 860 та 980 нм при збудженні лазером із довжиною хвилі випромінювання 532 нм. Із збільшенням температури змінюється співвідношення між інтенсивностями фотолюмінесценції. Найбільше чутливим до температурних змін виявився пік фотолюмінесценції з максимумом при 860 нм. На основі формули, що описує ймовірність випромінювальних

і безвипромінювальних процесів побудовано модель, яка визначає залежність інтенсивності фотолюмінесценції від температури. Згідно із експериментальною залежністю $I(T)$ обчислено енергію активації ($E = 90$ меВ), що визначає енергію необхідну для переходу іонів ербію зі стану $^4S_{3/2}$ в стан $^2H_{11/2}$.

Зафіксовано лінійну залежність між відношенням інтенсивностей фотолюмінесценції $\ln(I_{980}/I_{660})$ та температурою зразка. Розраховано чутливість сенсора, яка становить $0,43\text{ K}^{-1}$. Отже, досліджені стекла в обмеженому температурному інтервалі можуть використовуватись як оптичні термосенсиори.

Ключові слова: сенсори, склоподібні сплави, халькогенідні напівпровідники, фотолюмінесценція, рідкоземельні метали, випромінювання, фотосенсиори.

Tetiana YATSYNIUK

Postgraduate Student at the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7288-3189>

SCOPUS AUTHOR ID: 57658704300

Volodymyr HALYAN

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0066-7174>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422525700

Andrii KEVSHYN

Student of the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3581-8852>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422272900

Hanna SHAVAROVA

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, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0251-9327>

SCOPUS AUTHOR ID: 6506685303

Volodymyr HALIAN

Student at the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-0074-6576>

To cite this article: Yatsyniuk, T., Halyan, V., Kevshyn, A., Shavarova, G., Halian, V. (2025). Optichni термосенсиори на основі склоподібних сплавів $\text{Er}_2\text{S}_3\text{-Ag}_{0,05}\text{Ga}_{0,05}\text{Ge}_{0,95}\text{S}_2$ [Optical thermal sensors based on glassy alloys $\text{Er}_2\text{S}_3\text{-Ag}_{0,05}\text{Ga}_{0,05}\text{Ge}_{0,95}\text{S}_2$. Physics and educational technologies]. *Physics and Educational Technology*, 1, 114–119, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-15>

OPTICAL THERMOSENSORS BASED ON THE GLASSES $\text{Er}_2\text{S}_3\text{-Ag}_{0,05}\text{Ga}_{0,05}\text{Ge}_{0,95}\text{S}_2$

Optical sensors are one of the most promising technologies in modern solid-state physics and chemistry. They enable precise measurements and control of temperature, radiation levels, and monitoring of the pollution of various objects without physical contact. The use of such sensors significantly expands the capabilities in industrial production, medicine, and ecology. The relevance of optical sensor research is increasing with the development of modern technologies and the growing demands for accuracy, speed, and safety of measurements. They are used in fields that require high sensitivity to changes in temperature, pressure, humidity, gas concentrations, etc.

The luminescent properties of chalcogenide glass alloys with the composition $\text{Er}_2\text{S}_3\text{-Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_2$ at 0.42 mol.% Er_2S_3 were investigated. Photoluminescence was observed with emission peaks at 660, 860, and 980 nm upon excitation with a 532 nm wavelength laser. With an increase in temperature, the ratio between the intensities of the photoluminescence changes. The most sensitive to temperature variations was the photoluminescence peak at 860 nm. Based on the formula describing the probability of radiative and non-radiative processes, a model was built to determine the dependence of the photoluminescence intensity on temperature. According to the experimental dependence $I(T)$, the activation energy was calculated ($\Delta E = 90 \text{ meV}$), which defines the energy required for the transition of erbium ions from the $^4\text{S}_{3/2}$ state to the $^2\text{H}_{11/2}$ state.

A linear relationship between the intensity ratio of photoluminescence $\ln(I_{980}/I_{660})$ and the sample temperature was established. The sensor sensitivity was calculated to be 0.43 K^{-1} . Thus, the investigated glasses, within a limited temperature range, can be used as optical thermosensors.

Key words: sensors, glassy alloys, chalcogenide semiconductors, photoluminescence, rare earth metals, radiation, photosensors.

Вступ. Люмінесцентні властивості халькогенідних напівпровідників легованих рідкісноземельними металами відомі декілька десятиліть. Завдяки високій прозорості у видимому та інфрачервоному спектральному діапазоні (Ramarao, 2018; Ravagli, 2017), великій ширині забороненої зони та високому квантовому виходу випромінювання (Lima, 2002; Liu, 2017), такі матеріали стали об'єктами інтенсивного дослідження та впровадження у промислове виробництво.

В сучасному промисловому виробництві оптоелектронної техніки активно досліджуються і впроваджуються високоточні термічні сенсори, принцип дії яких базується на чутливості фотолюмінесцентного випромінювання до температурних змін (Ху, 2024; Shen, 2010). Для конструювання безконтактних фотосенсорів важливо встановити взаємний вплив механізмів релаксації іонів ербію та кросрелаксаційних процесів при зміні співвідношень інтенсивності люмінесценції в різних температурних інтервалах. Такі дослідження дозволять оптимізувати вибір компонентного складу для отримання ефективних люмінесцентних речовин.

Результати досліджень. Із перерізу $\text{Er}_2\text{S}_3\text{-Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_2$ (Halyan, 2009, р. 138-142) вибрано склоподібний сплав при 0,42 мол.% Er_2S_3 (0,27 ат% Er), в якому зафіксована найвища інтенсивність фотолюмінесценції (Halyan, 2019, р. 84-90), порівняно із іншими зразками цього перерізу, що леговані ербієм. У склоподібному сплаві зафіксовано фотолюмінесценцію із максимумами випромінювання 660, 860 та 980 нм при збудженні лазером із максимальною довжиною хвилі випромінювання 532 нм. На рис. 1 показано залежності інтенсивності смуг фотолюмінесценції від температури. Найбільша

інтенсивність фотолюмінесценції зареєстрована при 980 нм, а найменша при 660 нм. Як видно з рис. 1, зі збільшенням температури змінюється співвідношення між інтенсивностями ФЛ. При температурі вище 180 К інтенсивність всіх смуг зменшується. Найбільше чутливим до температурних змін виявився пік фотолюмінесценції з максимумом при 860 нм.

При збудженні спектрів ФЛ випромінюванням з $\lambda=532 \text{ нм}$ іони ербію переходять із основного в збуджений стан $^2\text{H}_{11/2}$. Максимуми випромінювання, які зареєстровані при 660, 860 та 980 нм відповідають внутрішньо-центровим переходам $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ та $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ в іоні ербію, відповідно.

Із рис. 1 бачимо, що температура зразка впливає на інтенсивність кожної смуги випромінювання, але не змінює спектрального розташування максимумів фотолюмінесценції. Оскільки смуги випромінювання загалом є не симетричними, тому ми обчислили логарифм інтегральної інтенсивності кожної із смуг і представили, як функціональну залежність від температури (рис. 2).

При високих температурах затухання фотолюмінесценції можна описати через ймовірності випромінювальних і безвипромінювальних процесів. Із літературних джерел (Kuznetsov, 2017, р.315-320) відомо, що залежність інтенсивності люмінесценції від температури описується формулою:

$$I(T) = \frac{I_0}{1 + W \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)}$$

де: I_0 – константа, k – стала Больцмана, W – коефіцієнт, що визначає відношення ймовірності безвипромінювальних до випромінювальних процесів, ΔE – термічна енергія активації люмінесценції.

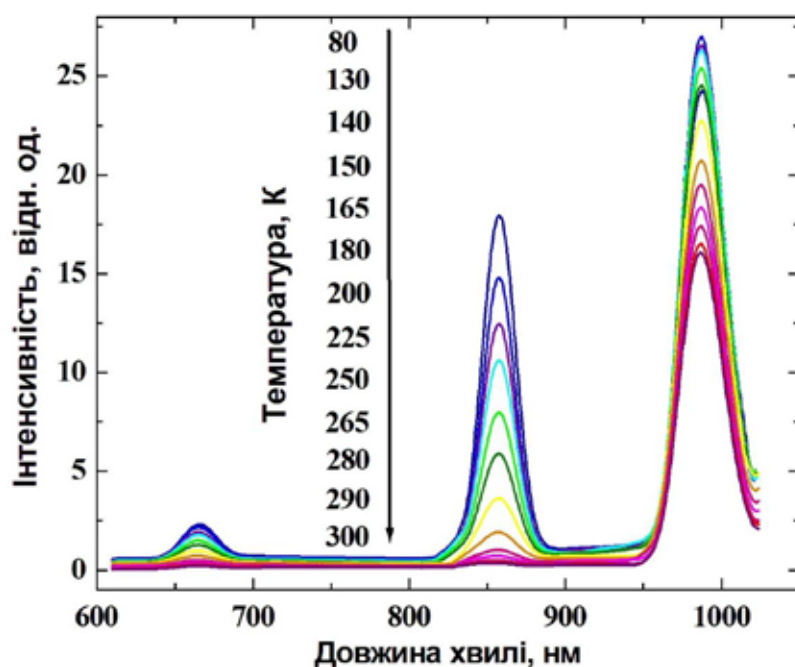


Рис. 1. Спектри фотолюмінесценції стекел $\text{Er}_2\text{S}_3\text{-Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_2$ при різних температурах (0,42мол.% Er_2S_3)

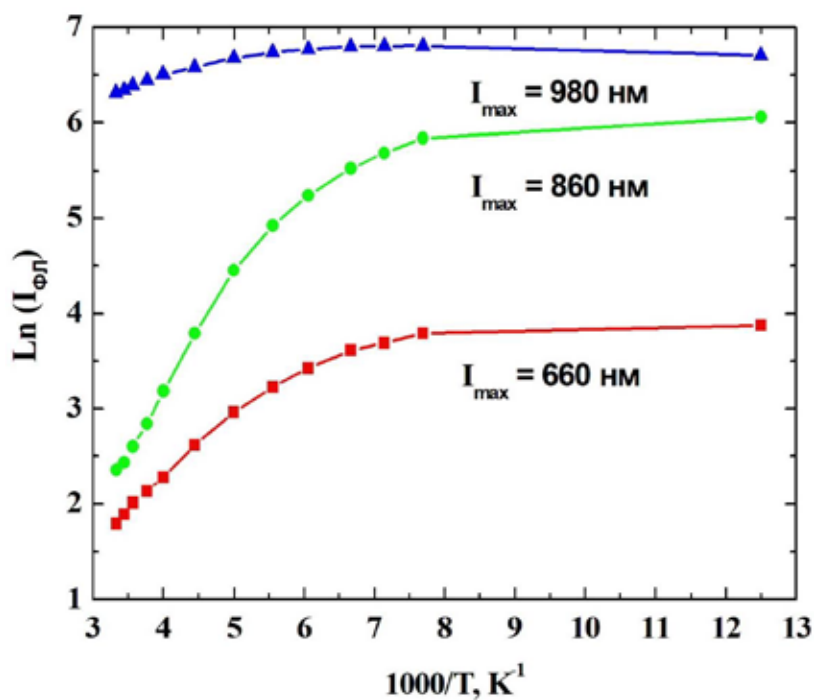


Рис. 2. Температурна залежність інтегральної інтенсивності фотолюмінесценції стекел $\text{Er}_2\text{S}_3\text{-Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_2$ при 0,42мол.% Er_2S_3

В дослідженому нами сплаві залежність $I(T)$ розрахована на основі вище вказаної формули для смуги із максимумом 860 нм і обчислена відповідна енергія активації ΔE , що становить 90 ± 6 меВ. Отримане значення добре

узгоджується із енергією, яка необхідна для переходу іонів ербію зі стану $^4\text{S}_{3/2}$ в стан $^2\text{H}_{11/2}$. На інтенсивність випромінювання червоної (660 нм) та інфрачервоної люмінесценції (980 нм) впливає активація носіїв із стану $^4\text{S}_{3/2}$

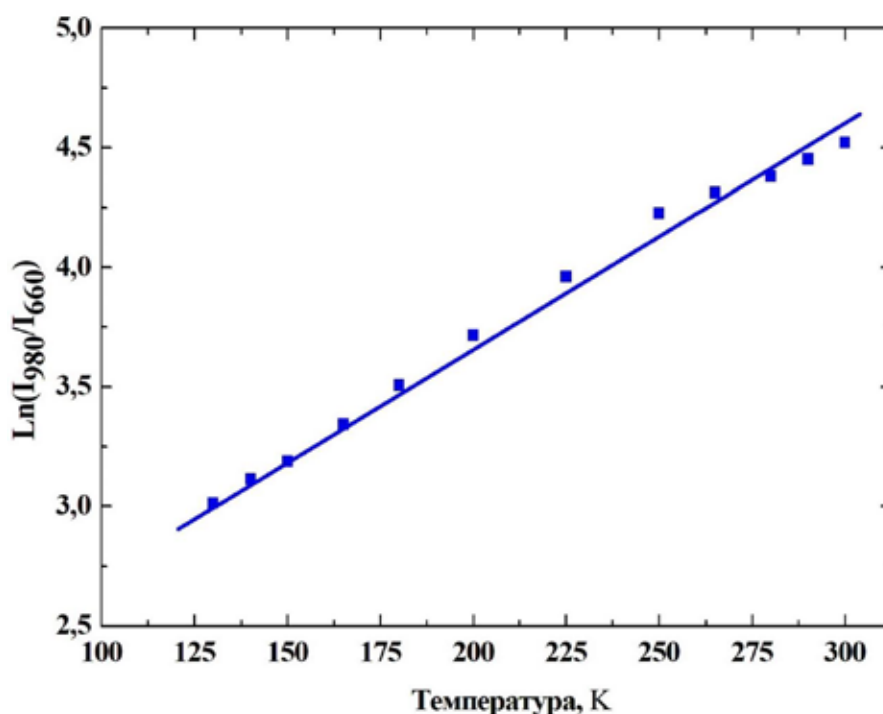


Рис. 3. Відношення інтегральних інтенсивностей фотолюмінесценції стекол $\text{Er}_2\text{S}_3\text{--Ag}_{0,05}\text{Ga}_{0,05}\text{Ge}_{0,95}\text{S}_2$ при 0,42 мол.% Er_2S_3 .

в стан $^2\text{H}_{11/2}$, вплив температури на кросрелаксаційні процеси, а також зміщення краю оптичного поглинання (Halyan, 2017, р. 315-320).

Зростання температури зразків приводить до змін у співвідношенні між інтенсивностями смуг фотолюмінесценції. Це явище має важливе значення при конструюванні сенсорних приладів. З рис. 3 видно, що існує лінійна залежність між відношенням $\ln(I_{980}/I_{660})$ та температурою зразка, тому досліджені стекла в обмеженому температурному інтервалі можуть використовуватись як термічні сенсори. За нашими дослідженнями чутливість сенсора (згідно із рис. 3) становить $0,43 \text{ K}^{-1}$ для зразка із 0,42 мол.% Er_2S_3 .

Висновки. Встановлено, що халькогенідні склоподібні напівпровідники перерізу $\text{Er}_2\text{S}_3\text{--Ag}_{0,05}\text{Ga}_{0,05}\text{Ge}_{0,95}\text{S}_2$ характеризуються високою інтенсивністю люмінесценції у видимому спектральному діапазоні. Інтенсивність смуг випромінювання із максимумами 660, 860 та 980 нм залежить від температури. За відношенням інтегральних інтенсивностей фотолюмінесценції стекол $\text{Er}_2\text{S}_3\text{--Ag}_{0,05}\text{Ga}_{0,05}\text{Ge}_{0,95}\text{S}_2$ обчислено чутливість ($\sim 0,43 \text{ K}^{-1}$) сплавів до температурних змін. Зразки можуть бути використані, як матеріали для високоточних оптичних термосенсорів, вимірювання в яких ґрунтується на чутливості фотолюмінесцентного випромінювання до зміни температури.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ramarao S.D., Mumbaraddi D., Kalsi D., Halappa P., Peter S.C. New quaternary chalcogenide glasses with wide range IR transparency. *Materials Research Express*. 2018. Vol.5. 075201
2. Ravagli A., Craig C., Lincoln J., Hewak D.W. Ga-La-S-Se glass for visible and thermal imaging. *Advanced Optical Technologies*. 2017. Vol.6(2). 131–136.
3. Lima S. M., de Camargo A. S. S., Nunes L. A. O., Catunda T., Hewak D. W. Fluorescence quantum efficiency measurements of excitation and nonradiative deexcitation processes of rare earth 4f-states in chalcogenide glasses. *Applied Physics Letters*. 2002. Vol. 81. 589–591
4. Liu Y., Liao M., Wang X., Chen G., Hu L. Mid-infrared spectroscopy of novel Er^{3+} doped indium modified chalcogenide glasses. *Journal of Luminescence*. 2017. Vol. 187. 1–8.
5. Xu W., Xu C., Cui J., Hu C., Wen G., Zheng L., Zhang Z., Sun Z., Zhang Y. Luminescence thermometry driven by a support vector machine: a strategy toward precise thermal sensing. *Optics Letters*. 2024. Vol. 49. 606–609.

6. Shen X., Nie Q., Xu T., Dai S., Wang X. Temperature dependence of upconversion luminescence in erbium-doped tellurite glasses. *Journal of Luminescence*. 2010. Vol. 130. 1353–1356.
7. Halyan V. V., Shevchuk M. V., Davydyuk G. Ye., Voronyuk S. V., Kevshyn A. H., Bulatetsky V. V. Glass formation region and X-ray analysis of the glassy alloys in $\text{AgGaSe}_2 + \text{GeS}_2 \rightleftharpoons \text{AgGaS}_2 + \text{GeSe}_2$ system. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. 2009. Vol. 12. 138–142.
8. Halyan V. V., Yukhymchuk V. O., Gule Ye. G., Ozga, K., Jedryka K. J., Ivashchenko I. A., Skoryk M. A., Kevshyn A. H., Olekseyuk I. D., Tishchenko P. V., Shevchuk M. V., Piasecki M. Photoluminescence features and nonlinear-optical properties of the $\text{Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_2\text{--Er}_2\text{S}_3$ glasses *Optical Materials*. 2019. Vol. 90. 84–88.
9. Kuznetsov A. S., Velazquez J. J., Tikhomirov V. K. Quantum yield of luminescence of Ag nanoclusters dispersed within transparent bulk glass vs. glass composition and temperature *J. Applied Physics Letters*. 2012. Vol. 101. 251106–251111.
10. 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. *Journal of Luminescence*. 2017. Vol. 181. 315–320.

REFERENCES:

1. Ramarao, S.D, Mumbaraddi, D., Kalsi, D., Halappa, P., & Peter, S.C. (2018). New quaternary chalcogenide glasses with wide range IR transparency. *Materials Research Express*, Vol. 5, 075201
2. Ravagli, A., Craig, C., Lincoln, J., & Hewak, D.W. (2017). Ga-La-S-Se glass for visible and thermal imaging. *Advanced Optical Technologies*., Vol. 6(2), 131–136.
3. Lima, S. M., de Camargo, A. S. S., Nunes, L. A. O., Catunda, T., & Hewak, D. W. (2002). Fluorescence quantum efficiency measurements of excitation and nonradiative deexcitation processes of rare earth 4f-states in chalcogenide glasses. *Applied Physics Letters*. Vol. 81, 589–591.
4. Liu, Y., Liao, M., Wang, X., Chen, G., & Hu, L. (2017). Mid-infrared spectroscopy of novel Er³⁺ doped indium modified chalcogenide glasses. *Journal of Luminescence*. Vol. 187, 1–8.
5. Xu, W., Xu, C., Cui, J., Hu, C., Wen, G., Zheng, L., et al. (2024) Luminescence thermometry driven by a support vector machine: a strategy toward precise thermal sensing. *Optics Letters*., Vol. 49, 606–609.
6. Shen, X., Nie, Q., Xu, T., Dai, S., & Wang, X. (2010) Temperature dependence of upconversion luminescence in erbium-doped tellurite glasses. *Journal of Luminescence*., Vol. 130, 1353–1356
7. Halyan, V. V., Shevchuk, M. V., Davydyuk, G. Ye., Voronyuk, S. V., Kevshyn, A. H., & Bulatetsky, V. V. (2009). Glass formation region and X-ray analysis of the glassy alloys in $\text{AgGaSe}_2 + \text{GeS}_2 \rightleftharpoons \text{AgGaS}_2 + \text{GeSe}_2$ system. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*., Vol. 12, 138–142.
8. Halyan, V. V., Yukhymchuk, V. O., Gule, Ye. G., Ozga, K., Jedryka, K. J., Ivashchenko, I. A., et al. (2019). Photoluminescence features and nonlinear-optical properties of the $\text{Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_2\text{--Er}_2\text{S}_3$ glasses. *Optical Materials*., Vol. 90, 84–88.
9. Kuznetsov, A. S., Velazquez, J. J., & Tikhomirov, V. K. (2012). Quantum yield of luminescence of Ag nanoclusters dispersed within transparent bulk glass vs. glass composition and temperature *J. Applied Physics Letters*., Vol. 101, 251106–251111.
10. Halyan, V. V., Kityk, I. V., Kevshyn, A. H., Ivashchenko, I. A., Lakshminarayana, G., Shevchuk, M. V., et al. (2017). 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. *Journal of Luminescence*., Vol. 181, 315–320.

УДК 621.315.592

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-16>

Тетяна ЯЦИНЮК

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7288-3189>

SCOPUS-AUTHOR ID: 57658704300

Володимир ГАЛЯН

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0066-7174>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422525700

Андрій КЕВШИН

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3581-8852>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422272900

Ганна ШАВАРОВА

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0251-9327>

SCOPUS AUTHOR ID: 6506685303

Віталій АРТЮХ

аспірант навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7785-6072>

Богдан СВІТЛИКОВСЬКИЙ

аспірант навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-0113-3726>

Бібліографічний опис статті: Яцинюк, Т., Галян, В., Кевшин, А., Шаварова, Г., Артюх, В., Світліковський, Б. (2025). Оптичне поглинання стекол системи $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$ легованих Er та Nd. *Фізика та освітні технології*, 1, 120–127, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-16>

**ОПТИЧНЕ ПОГЛИНАННЯ СТЕКОЛ СИСТЕМИ $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$
ЛЕГОВАНИХ Er ТА Nd**

Оптичне поглинання в халькогенідних напівпровідниках є важливим як з фундаментальної, так і з прикладної точок зору. Аналіз спектрів оптичного поглинання в халькогенідних склоподібних сплавах допомагає розкрити електронну структуру та природу хімічних зв'язків у цих матеріалах та сприяє глибшому розумінню фізики неупорядкованих систем. Дослідження оптичних властивостей халькогенідних стекол сприяє розробці нових

матеріалів з покращеними характеристиками, а також допомагає виявити наявність дефектів і домішок, які можуть впливати на їх оптичні та фотоелектричні властивості.

Досліджено спектри оптичного поглинання стекол 20 моль. % Ga_2S_3 – 60 моль. % GeS_2 – 20 моль. % Sb_2S_3 та 25 моль. % Ga_2S_3 – 30 моль. % GeS_2 – 45 моль. % Sb_2S_3 одночасно легованих Er та Nd в діапазоні 550 – 2000 нм при кімнатній температурі. Край оптичного поглинання стекол знаходиться близько 600 нм і не зазнає суттєвих змін при їх легуванні Er та Nd . Зареєстровано вузькі смуги поглинання з максимумами 655, 755, 810, 885, 980 і 1540 нм, що відповідають переходам в f -оболонці іонів Er^{3+} і Nd^{3+} .

З графіка, що визначає край оптичного поглинання, екстраполяцією лінійної ділянки експериментальної кривої до перетину з віссю абсцис оцінено оптичну ширину забороненої зони стекол. Встановлено, що при збільшенні вмісту Sb_2S_3 (20 – 45 моль. %) відбувається зміщення краю оптичного поглинання в сторону більших довжин хвиль, що призводить до зменшення ширини забороненої зони досліджених склоподібних сплавів. Додавання (1 – 3) моль. % Er_2S_3 не призводить до значних змін E_g та при подальшому збільшенні цієї компоненти зафіксовано деяке зростання ($\sim 0,04$ eV) енергії забороненої зони.

Низькі значення коефіцієнта поглинання в діапазоні 1000 – 2000 нм свідчать про хороші перспективи використання досліджених стекол в оптоелектронній техніці, що працює близькому інфрачервоному діапазоні.

Ключові слова: оптичне поглинання, склоподібні сплави, халькогенідний напівпровідник, ширина забороненої зони, ербій, неодимій.

Tetiana YATSYNIUK

Postgraduate Student at the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7288-3189>

SCOPUS AUTHOR ID: 57658704300

Volodymyr HALYAN

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0066-7174>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422525700

Andrii KEVSHYN

Student at the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3581-8852>

SCOPUS AUTHOR ID: 35422272900

Hanna SHAVAROVA

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, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0251-9327>

SCOPUS AUTHOR ID: 6506685303

Vitaly ARTYUKH

Postgraduate 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: <https://orcid.org/0000-0002-7785-6072>

Bohdan SVITLIKOVSKIY

Postgraduate 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: <https://orcid.org/0009-0004-0113-3726>

To cite this article: Yatsyniuk, T., Halyan, V., Kevshyn, A., Shavarova, G., Artyuh, V., Svilikovskiy, B. (2025). Optichne poglinannya stekol sistemi $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$ legovanih Er ta Nd [Optical absorption classes in the $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$ system doped with Er and Nd]. *Physics and Educational Technology*, 1, 120–127, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-16>

OPTICAL ABSORPTION OF GLASSES IN THE $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$ SYSTEM DOPED WITH Er AND Nd

Optical absorption in chalcogenide semiconductors is important from both fundamental and applied perspectives. The analysis of optical absorption spectra in chalcogenide glassy alloys helps reveal the electronic structure and the nature of chemical bonds in these materials, contributing to a deeper understanding of the physics of disordered systems. Studies of the optical properties of chalcogenide glasses assist in the development of new materials with improved characteristics and help identify defects and impurities that may influence their optical and photoelectrical properties.

The optical absorption spectra of glasses with compositions of 20 mol.% Ga_2S_3 – 60 mol.% GeS_2 – 20 mol.% Sb_2S_3 and 25 mol.% Ga_2S_3 – 30 mol.% GeS_2 – 45 mol.% Sb_2S_3 simultaneously doped with Er and Nd were studied in the range of 550 – 2000 nm at room temperature. The edge of optical absorption of the glasses is located around 600 nm and does not undergo significant changes upon doping with Er and Nd. Narrow absorption bands were registered with maxima at 655, 755, 810, 885, 980, and 1540 nm, corresponding to transitions in the f-shells of Er^{3+} and Nd^{3+} ions.

From the graph defining the edge of optical absorption, the optical band gap of the glasses was estimated by extrapolating the linear portion of the experimental curve to the intersection with the abscissa axis. It was found that with an increase in the Sb_2S_3 content (from 20 to 45 mol.%), the optical absorption edge shifts towards longer wavelengths, resulting in a decrease in the band gap of the studied glassy alloys. The addition of (1 – 3) mol.% Er_2S_3 does not lead to significant changes in the band gap, and with further increases in this component, a slight increase (~ 0.04 eV) in the band gap was recorded.

The low values of the absorption coefficient in the 1000 – 2000 nm range indicate promising prospects for the use of these glasses in optoelectronic devices operating in the near-infrared range.

Key words: optical absorption, glassy alloys, chalcogenide semiconductor, band gap, erbium, neodymium.

Вступ. Дослідження спектрів оптичного поглинання в халькогенідних склоподібних сплавах є важливим чинником для розуміння діапазону прозорості та природи оптичних центрів, які впливають на їх оптичні властивості. Сульфуровмісні стекла застосовують у фотоніці, лазерних технологіях, оптичних підсилювачах та сенсорах завдяки своїй здатності до ефективного поглинання / пропускання світла у видимому та близькому інфрачервоному діапазонах (Eggleton, 2011; Нео, 2014; Chen, 2011). Крім того, дослідження спектрів поглинання сплавів (Кевшин 2010; Галян 2016) дозволяє визначити енергетичні рівні, положення яких може значно вплинути на їх оптичні та електричні властивості, що є важливою інформацією при конструюванні нових оптоелектронних пристроїв.

Результати досліджень. Досліджено спектри оптичного поглинання стекел 20 моль. % Ga_2S_3 – 60 моль. % GeS_2 – 20 моль. % Sb_2S_3 одночасно легованих Er та Nd в діапазоні 550 – 2000 нм при кімнатній температурі (рис. 1). Край оптичного поглинання стекел знаходиться близько 600 нм і не зазнає суттєвих змін при їх легуванні Er та Nd. Зразки демонструють високу прозорість в спектральному

діапазоні 700 – 2000 нм. Водночас, зареєстровано вузькі смуги поглинання з максимумами 655, 755, 810, 885, 980 і 1540 нм, що відповідають переходам в f-оболонці іонів Er^{3+} і Nd^{3+} (рис. 1). Із збільшенням вмісту ербію зростає інтенсивність домішкових смуг поглинання, які пов'язані з іонами Er^{3+} . В таблиці 1. подано максимумами поглинання, переходи в f-оболонці та іони, які їм відповідають. Єдина смуга поглинання із максимумом 810 нм є спільною для іонів ербію та неодимію.

Енергетичний спектр електронів у склоподібних напівпровідниках характеризується областями із високою та низькою густиною електронних станів, що пов'язано з відсутністю далекого порядку у їх структурі. Тому зонна структура стекел відрізняється від кристалічних напівпровідників і містить додаткові дозволені електронні стани. Густина цих станів зменшується у глибину забороненої зони (рис. 2), внаслідок чого виникають «хвости» густини станів.

Якщо вважати залежність густини станів у «хвостах» дозволених енергетичних зон від енергії лінійною (Студеняк, 2021, с. 272), отримаємо переходи носіїв із делокалізованих станів у валентиній зоні в локалізовані стани в зоні провідності або з локалізованих станів

Таблиця 1

Максимуми поглинання в іонах Er^{3+} , Nd^{3+} та відповідні їм переходи

Іон	655, нм	755, нм	810, нм	885, нм	980, нм	1540, нм
Er^{3+}	$^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^4\text{F}_{9/2}$		$^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$		$^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$	$^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$
Nd^{3+}		$^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{F}_{7/2}, ^4\text{S}_{3/2}$	$^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{F}_{5/2}, ^2\text{H}_{9/2}$	$^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{F}_{3/2}$		

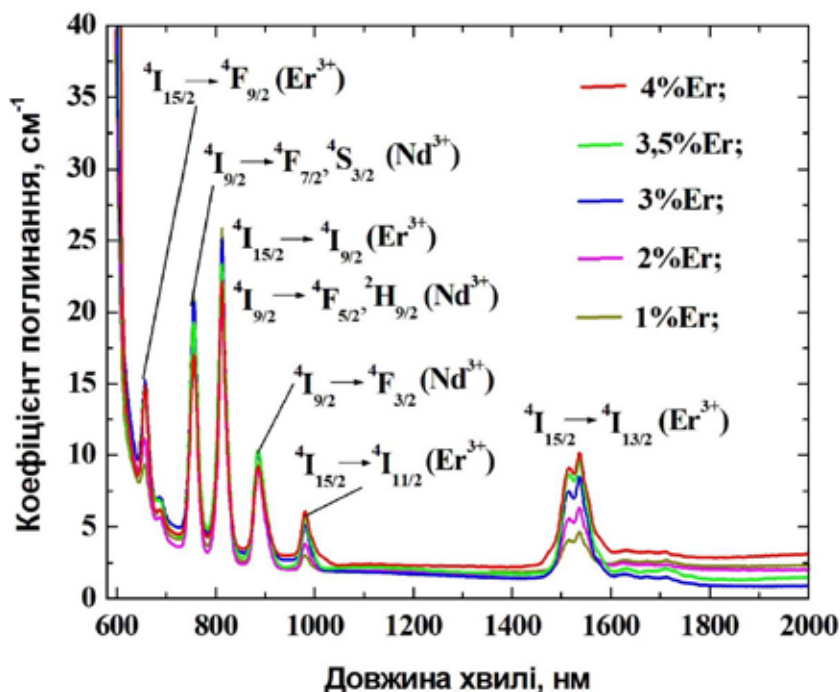


Рис. 1. Спектр поглинання стекол 20 моль. % Ga_2S_3 – 60 моль. % GeS_2 – 20 моль. % Sb_2S_3 : 1-4 % Er; 2 % Nd

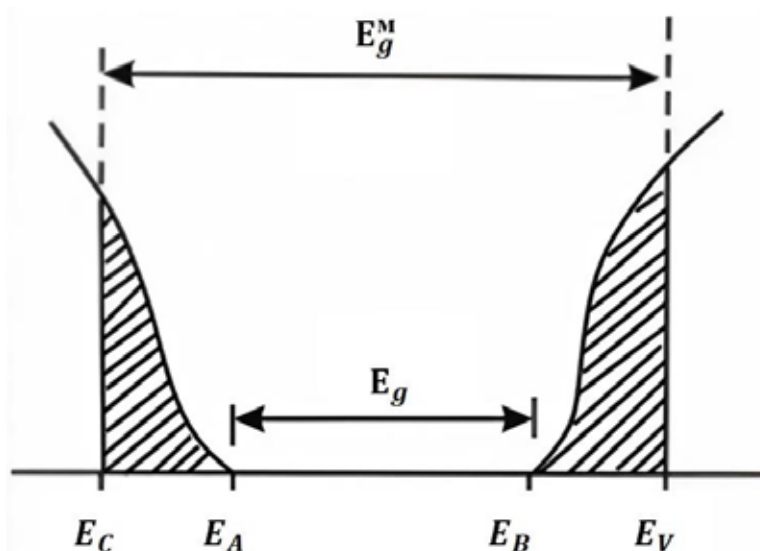


Рис. 2. Модель зонної структури аморфних напівпровідників (Mott, 1971, р. 437). E_g – ширина забороненої зони, визначена за відстанню між локалізованими станами; E_g^M – ширина забороненої зони, визначена за краєм рухливості носіїв заряду; $E_C - E_A = E_B - E_V = E_{\text{lok}}$ – ширина локалізованих станів в хвостах енергетичних зон.

у «хвості» валентної зони в зону провідності делокалізованих станів. Екстраполюючи лінійну ділянку (рис. 1) експериментальної кривої $(\alpha \cdot hv)^{1/2} \sim hv$ до перетину з віссю абсцис можемо оцінити оптичну ширину забороненої зони стекол. На рис. 3 подано край оптичного поглинання досліджених склоподібних сплавів. Зауважимо, що переходи носіїв заряду між «хвостами» відповідних зон не враховується.

Як видно із рис. 3, при вмісті (1 – 3) % Er лінійна ділянка краю оптичного поглинання паралельно зміщується в область менших довжин хвиль. При подальшому збільшенні концентрації ербію (3,5, 4 % Er) змінюється нахил краю поглинання, внаслідок чого оптична ширина забороненої зони зростає.

Для того, щоб дослідити вплив компоненти Sb_2S_3 на оптичні властивості досліджуваної системи, були синтезовані склоподібні сплави 25 моль. % Ga_2S_3 – 30 моль. % GeS_2 – 45 моль. % Sb_2S_3 : (1 – 4) % Er; 2 % Nd. Для цієї системи проведено дослідження спектрів оптичного поглинання в діапазоні 600 – 2000 нм (рис. 4). Зафіксовано вузькі смуги поглинання, що відповідають переходам в f-оболонках (відповідні переходи позначено на рисунку) іонів ербію та

неодимію. При збільшенні вмісту Sb_2S_3 (20 – 45 моль. %) відбулось зміщення краю оптичного поглинання в сторону більших довжин хвиль. Крім того, порівнюючи рис. 1 та рис. 4, видно збільшення коефіцієнта поглинання (при 2000 нм) від $1\text{--}3\text{ см}^{-1}$ до $6\text{--}8\text{ см}^{-1}$ при зростанні компоненти Sb_2S_3 . За результатами досліджень вибрано область біля краю оптичного поглинання і побудовано графіки залежності $(\alpha \cdot hv)^{1/2}$ від hv для зразків із різним вмістом ербію (рис. 5). Якщо екстраполювати лінійну частину графіка прямою до перетину з віссю hv можемо

визначити оптичну ширину забороненої зони та подати в енергетичних одиницях eV (рис. 6). При збільшенні з 20 моль. % Sb_2S_3 до 45 моль. % Sb_2S_3 ширина забороненої зони зменшується на $\sim 0,3\text{ eV}$, що може бути пов'язано із структурною трансформацією склоподібних сплавів. Додавання (1 – 3) моль. % Er_2S_3 не призводить до значних змін E_g та при подальшому збільшенні цієї компоненти фіксуємо деяке зростання енергії забороненої зони. Введення рідкісноземельних металів в аморфне середовище покращує люмінесцентні властивості (Lozano, 2013; Halyan, 2013; Shen 2010), але сприяє його кристалізації (Pan, 2022, p.100998).

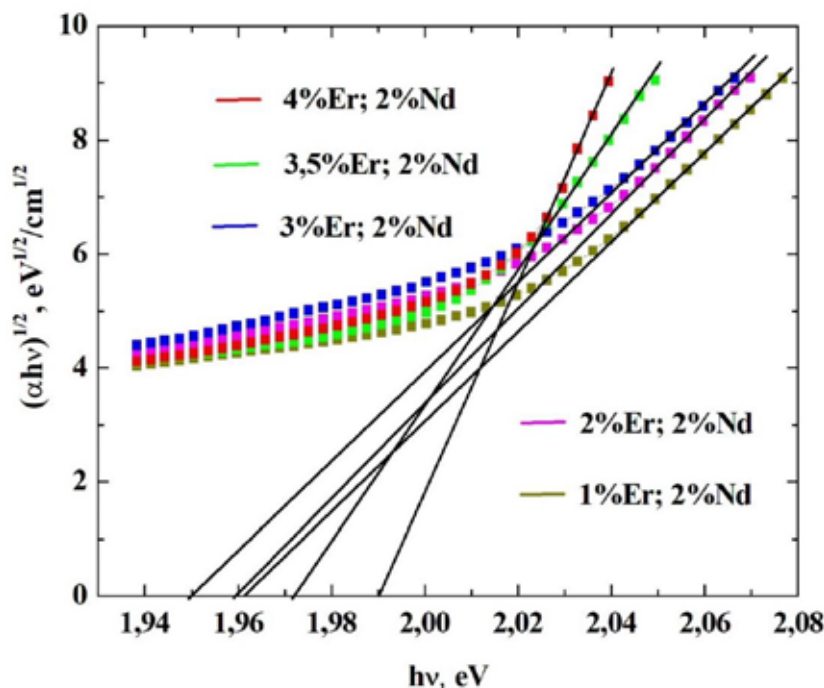


Рис. 3. Край оптичного поглинання стекол 20 mol. % Ga_2S_3 – 60 mol. % GeS_2 – 20 mol. % Sb_2S_3 : (1 – 4) % Er; 2 % Nd

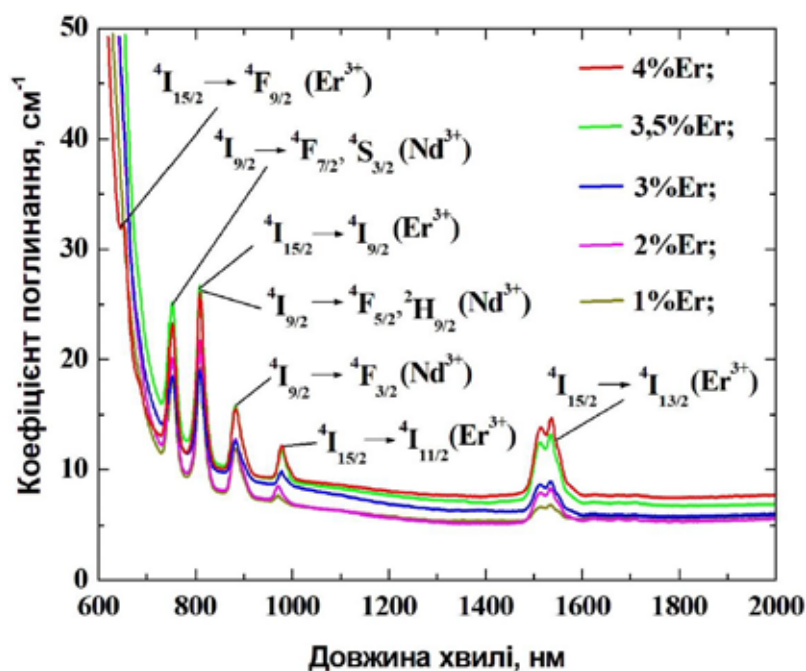


Рис. 4. Спектр поглинання стекол 25 моль. % Ga_2S_3 – 30 моль. % GeS_2 – 45 моль. % Sb_2S_3 : 1-4 % Er; 2 % Nd

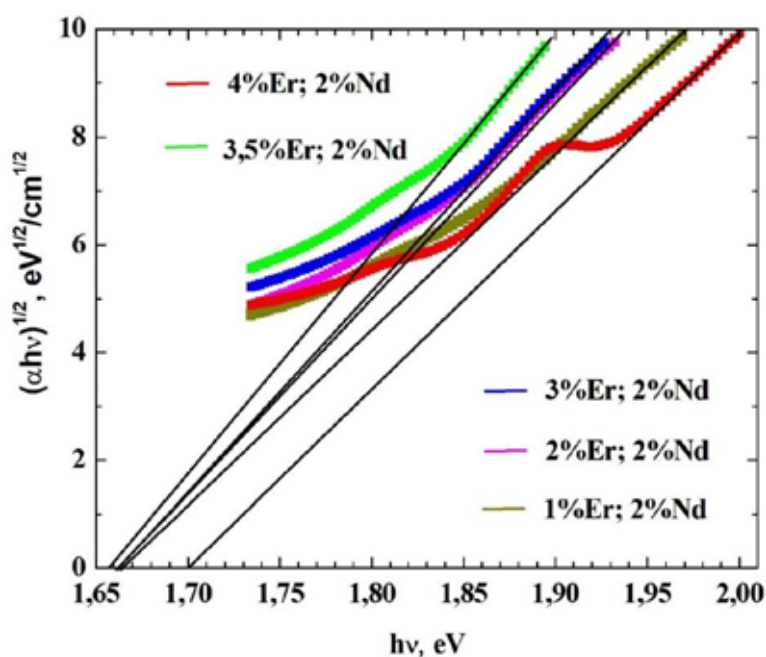


Рис. 5. Край оптичного поглинання стекол 25 моль. % Ga_2S_3 – 30 моль. % GeS_2 – 45 моль. % Sb_2S_3 : 1-4 % Er; 2 % Nd

Тому при великих вмістах Er_2S_3 у склаотворюючій матриці можуть виникати мікро- чи нанонеоднорідності, що впливатиме на оптичні властивості халькогенідних сплавів і, зокрема, на ширину забороненої зони.

Висновки. Досліджено спектри оптичного поглинання халькогенідних склоподібних

сплавів 20 моль. % Ga_2S_3 – 60 моль. % GeS_2 – 20 моль. % Sb_2S_3 та 25 моль. % Ga_2S_3 – 30 моль. % GeS_2 – 45 моль. % Sb_2S_3 , які були одночасно леговані Er та Nd. Екстраполяцією лінійної ділянки експериментальної кривої $(\alpha \cdot hv)^{1/2} \sim hv$ до перетину з віссю абсцис оцінено оптичну ширину забороненої зони стекол.

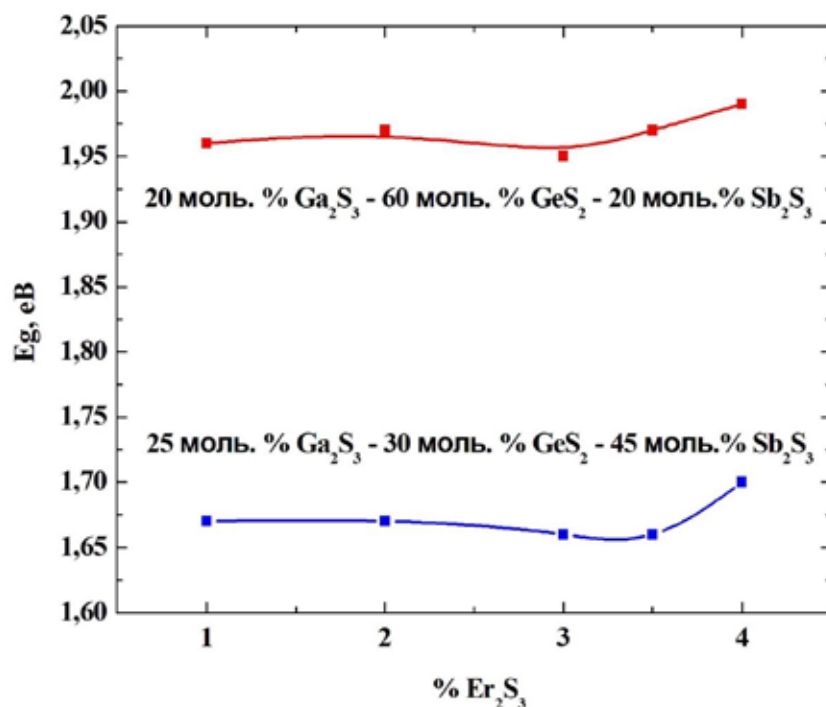


Рис. 6. Концентраційна залежність ширини забороненої зони стекел системи $\text{Ga}_2\text{S}_3 - \text{GeS}_2 - \text{Sb}_2\text{S}_3$

При збільшенні мол.% Sb_2S_3 ширина забороненої зони стекел зменшується на $\sim 0,3$ еВ, що може бути пов'язано із структурною трансформацією склоподібних сплавів. Додавання (1 – 3)

моль.% Er_2S_3 не призводить до значних змін E_g та при подальшому збільшенні цієї компоненти фіксуємо деяке зростання ($\sim 0,04$ еВ) енергії забороненої зони.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Eggleton B. J., Luther-Davies B., Richardson K. Chalcogenide photonics. *Nature Photonics* 2011. Vol. 5, 141–148.
2. Heo J., Chung W.J., Adam J.-C., Zhang X. Rare-earth-doped chalcogenide glass for lasers and amplifiers. *Chalcogenide Glasses. Preparation, Properties and Applications*. Cambridge, UK : Woodhead Publishing Limited 2014, p. 347–378.
3. Chen P. Ailavajhala M., Mitkova M. et al. Structural Study of Ag-Ge-S Solid Electrolyte Glass System for Resistive Radiation Sensing. *IEEE. Microelectronics and Electron Devices* 2011. 1–4.
4. Кевшин А.Г., Галян В.В., Давидюк Х.Є., Парасюк О.В., Мазурець І.І. Концентраційна залежність оптичних властивостей склоподібних сплавів у системі $\text{HgS}-\text{Ga}_2\text{S}_3-\text{GeS}_2$. *Фізика та хімія скла*. 2010, № 36, с. 27–32.
5. Галян В. В., Кевшин А. Г., Іващенко І. А., Шевчук М. В. Вплив заміни S на Se на спектри оптичного поглинання склоподібних сплавів $\text{Ag}_{1,6}\text{Ga}_{1,6}\text{Ge}_{31,2}\text{S}_{61,6-x}\text{Se}_x$. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2016. Т. 17. № 3. с. 342–346.
6. Mott N.F. Davis E.A. Electronic Processes in Non-Crystalline Materials. *Oxford: Clarendon-Press*. 1971. p.437.
7. Студеняк І.П., Сусліков Л.М. Оптичні властивості кристалічних та некристалічних матеріалів. *навчальний посібник*. Ужгород: Видавництво УжНУ "Говерла". 2021. 272 с.
8. 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.
9. Halyan V. V., Strelchuk V. V., Yukhymchuk V. O. 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.
10. 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.
11. Pan Q., Yang D., Dong G., Qiu J., Yang Z. Nanocrystal-in-glass composite (NGC): A powerful pathway from nanocrystals to advanced optical materials. *Prog. Mater. Sci.* 2022. Vol. 130. p. 100998.

REFERENCES:

1. Eggleton, B. J., Luther-Davies, B., & Richardson, K. (2011). Chalcogenide photonics. *Nature Photonics*, Vol. 5, 141–148.

2. Heo, J., Chung, W.J. J.-C. Adam, X. Zhang (2014). Rare-earth-doped chalcogenide glass for lasers and amplifiers. *Chalcogenide Glasses. Preparation, Properties and Applications*. Cambridge, UK : Woodhead Publishing Limited., 347–378.
3. Chen, P., Ailavajhala, M., & Mitkova, M. (2011). Structural Study of Ag-Ge-S Solid Electrolyte Glass System for Resistive Radiation Sensing. *Microelectronics and Electron Devices*, 1–4.
4. Kevshyn, A. H., Halyan, V. V., Davydyuk, H. Ye., Parasyuk, O. V., & Mazurets, I. I. (2010). Kонтсентратиіна залежність оптичних властивостей склоподібних сплавів у системі $\text{HgS}-\text{Ga}_2\text{S}_3-\text{GeS}_2$ [Concentration dependence of the optical properties of glassy alloys in the $\text{HgS}-\text{Ga}_2\text{S}_3-\text{GeS}_2$ system. *Фізика та хімія скла. – Glass Phys. Chem.*, Vol. 36, 27–32. [in Ukrainian]
5. Halyan, V. V., Kevshin, A. G., Ivashchenko, I. A., & Shevchuk, M. V. (2016). Вплив заміни S на Se на спектри оптичного поглинання склоподібних сплавів $\text{Ag}_{1,6}\text{Ga}_{1,6}\text{Ge}_{31,2}\text{S}_{61,6-x}\text{Se}_x$ [The effect of replacing S with Se on the optical absorption spectra of glassy alloys $\text{Ag}_{1,6}\text{Ga}_{1,6}\text{Ge}_{31,2}\text{S}_{61,6-x}\text{Se}_x$]. *Фізика і хімія твердого тіла. -Physics and Chemistry of Solids*, Vol.17, 3, 342–346. [in Ukrainian]
6. Mott, N.F., & Davis, E.A. (1971). Electronic Processes in Non-Crystalline Materials. *Oxford: Clarendon-Press*, 437.
7. Studenyak, I.P., & Suslikov, L.M. (2021). Оптичні властивості кристалічних та некристалічних матеріалів [Optical properties of crystalline and non-crystalline materials] *Ужгород: Wydawnictwo UzhNU "Hoverla"- Uzhhorod: Publishing house of UzhNU "Hoverla"*, 272 [in Ukrainian]
8. Lozano, W., Ara, C. B., Ledemi, Y., & Messaddeq, Y. (2013). 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.* Vol.113, 083520-1–083520-6.
9. Halyan, V. V., Strelchuk, V. V., & Yukhymchuk, V. O. (2013). 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*, Vol. 411, 15, 35–39.
10. Shen, X., Nie, Q., Xu, T., Dai, Sh., & Wang, X. (2010). Temperature dependence of upconversion luminescence in erbium-doped tellurite glasses. *J. Lumin.* Vol. 130, 1353–1356.
11. Pan, Q., Yang, D., Dong, G., Qiu, J., & Yang, Z. (2022). Nanocrystal-in-glass composite (NGC): A powerful pathway from nanocrystals to advanced optical materials. *Prog. Mater. Sci.*, Vol. 130, 100998.

ЗМІСТ

Катерина ГЕРАСИМОВА

АПРОКСИМАЦІЯ НА ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТТЯХ З ФІЗИКИ

У ТЕХНІЧНИХ УНІВЕРСИТЕТАХ3

Ніна ГОЛОВІНА, Микола ГОЛОВІН, Оксана ОСТРЕЙ, Григорій КОБЕЛЬ,

Олександр МАРТИНЮК, Галина МИРОНЧУК

ДО ПИТАННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ТА ПРОВЕДЕННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ПРАКТИКИ

«ОСВІТНІ ПРОЕКТНІ ТЕХНОЛОГІЇ».....10

Дмитро ІВАНЮК, Андрій КЕВШИН

ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КРИСТАЛІВ $(\text{TiGaSe}_2)_{1-x}(\text{SnSe}_2)_x$ ($x=0,05; 0,1$)..... 20

Андрій КЕВШИН, Володимир ГАЛЯН, Назар КЕВШИН

МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ПРОФЕСІЙНИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ СТУДЕНТІВ

ЗАСОБАМИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ З ФІЗИКИ..... 31

Андрій КЕВШИН, Володимир ГАЛЯН, Олексій НОВОСАД, Назар КЕВШИН,

Андрій СЕМЕНЮК

ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ З ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ

ЯВИЩ У ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ЗМІННОГО СТРУМУ.....39

Григорій КОБЕЛЬ, Ніна ГОЛОВІНА, Валентин САВОШ, Галина МИРОНЧУК

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ЗАДАЧІ В СТРУКТУРІ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ УНІВЕРСИТЕТСЬКОГО

КУРСУ ФІЗИКИ.....47

Олександр МАРТИНЮК

МІКРОКОНТРОЛЕРНА СХЕМОТЕХНІКА ТА ЗАСОБИ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

В СИСТЕМІ STEM-НАВЧАННЯ РОБОТОТЕХНІКИ.....55

Ігор МАШЕВСЬКИЙ

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНІ ЛІДАРИ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ.....62

Олексій НОВОСАД, Андрій КЕВШИН

ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДІОДНИХ СТРУКТУР $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$

та $\text{In-Ga/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$69

Павло САХНЮК, Оксана ЗАМУРУЄВА

МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ ДЖОЗЕФСОНІВСЬКИХ КОНТАКТІВ

З ДРУГОЮ ГАРМОНІКОЮ В СТРУМ-ФАЗОВІЙ ЗАЛЕЖНОСТІ.....76

Любов СОБОЛЕНКО, Світлана СОРОКІНА, Вікторія СТОЛЯР

РОЗВИТОК КОГНІТИВНИХ ЗДІБНОСТЕЙ ЗДОБУВАЧІВ ОСВІТИ ПІД ВПЛИВОМ РІЗНИХ

ЖАНРІВ МУЗИКИ.....83

Petro TROKHIMCHUCK

SOME PROBLEMS OF WHITE DWARF MODELLING92

Petro TROKHIMCHUCK, Vladyslav SAKHAN

VOLTERRA AND LOTKA-VOLTERRA SYSTEMS OF KINETIC EQUATIONS AND THEIR EXPANSION

AND APPLICATIONS.....101

Олексій НОВОСАД, Олег ШИГОРІН, Хадж Каддур БЕЛЛАҒРА, Людмила ПІСКАЧ,

Віктор ГОМІЛКО

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ТА ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КРИСТАЛІВ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ

ПО ПЕРЕРІЗУ $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}\text{-Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$108

**Тетяна ЯЦИНЮК, Володимир ГАЛЯН, Андрій КЕВШИН, Ганна ШАВАРОВА,
Володимир ГАЛЯН**

ОПТИЧНІ ТЕРМОСЕНСори НА ОСНОВІ СКЛОПОДІБНИХ СПЛАВІВ

$\text{Er}_2\text{S}_3\text{-Ag}_{0,05}\text{Ga}_{0,05}\text{Ge}_{0,95}\text{S}_2$114

**Тетяна ЯЦИНЮК, Володимир ГАЛЯН, Андрій КЕВШИН, Ганна ШАВАРОВА,
Віталій АРТЮХ, Богдан СВІТЛКОВСЬКИЙ**

ОПТИЧНЕ ПОГЛИНАННЯ СТЕКОЛ СИСТЕМИ $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$ ЛЕГОВАНИХ Er та Nd.....120

CONTENTS

Kateryna HERASYMOVA

APPROXIMATION IN PHYSICS LABORATORY CLASSES

AT TECHNICAL UNIVERSITIES.....3

**Nina HOLOVINA, Mykola HOLOVIN, Oksana OSTREI, Hryhorii KOBEL,
Oleksandr MARTYNIUK, Galina MYRONCHUK**

ON THE ISSUE OF ORGANIZATION AND CONDUCT OF EDUCATION PRACTICE

“EDUCATIONAL PROJECT TECHNOLOGIES”10

Dmytro IVANYUK, Andriy KEVSHYN

OPTICAL PROPERTIES OF CRYSTALS $(\text{TiGaSe}_2)_{1-x}(\text{SnSe}_2)_x$20

Andriy KEVSHYN, Volodymyr HALYAN, Nazar KEVSHYN

METHODOLOGICAL ASPECTS OF DEVELOPING STUDENTS’ PROFESSIONAL COMPETENCIES

BY SOLVING PHYSICS PROBLEMS.....31

**Andriy KEVSHYN, Volodymyr HALYAN, Oleksii NOVOSAD, Nazar KEVSHYN,
Andriy SEMENYUK**

FEATURES OF CONDUCTING LABORATORY CLASSES ON THE RESEARCH OF RESONANCE

PHENOMENA IN ELECTRICAL CIRCUITS OF ALTERNATING CURRENT.....39

Hryhorii KOBEL, Nina HOLOVINA, Valentyn SAVOSH, Galina MYRONCHUK

EXPERIMENTAL PROBLEMS IN THE STRUCTURE OF PRACTICAL CLASSES

OF THE UNIVERSITY COURSE OF PHYSICS.....47

Oleksandr MARTYNIUK

MICROCONTROLLER CIRCUIT TECHNIQUE AND THREE-DIMENSIONAL MODELING TOOLS

IN THE STEM-TRAINING SYSTEM OF ROBOTICS.....55

Igor MASHEVSKY

MULTISPECTRAL LIDAR SYSTEMS AND THEIR APPLICATIONS.....62

Oleksii NOVOSAD, Andriy KEVSHYN

PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF $\text{In/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ AND $\text{In-Ga/CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ DIODE STRUCTURES....69

Pavlo SAKHNIUK, Oksana ZAMURUIEVA

MAGNETIC PROPERTIES OF JOSEPHSON JUNCTIONS WITH A SECOND HARMONIC

IN THE CURRENT-PHASE RELATIONSHIP.....76

Liubov SOBOLENKO, Svitlana SOROKINA, Victoria STOLYAR

DEVELOPMENT OF COGNITIVE ABILITIES OF STUDENTS

UNDER THE INFLUENCE OF DIFFERENT GENRES OF MUSIC.....83

Petro TROKHIMCHUCK

SOME PROBLEMS OF WHITE DWARF MODELLING92

Petro TROKHIMCHUCK, Vladyslav SAKHAN

VOLTERRA AND LOTKA-VOLTERRA SYSTEMS OF KINETIC EQUATIONS AND THEIR EXPANSION

AND APPLICATIONS.....101

**Oleksii NOVOSAD, Oleg SHYGORIN, Hadj Kaddur BELLAGRA, Lyudmyla PISKACH,
Victor GOMILKO**

THERMOELECTRIC AND OPTICAL PROPERTIES OF SOLID SOLUTION CRYSTALS ACROSS

THE $\text{Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeSe}_{12}\text{-Pb}_4\text{Ga}_4\text{GeS}_{12}$ SECTION.....108

<i>Tetiana YATSYNIUK, Volodymyr HALYAN, Andrii KEVSHYN, Hanna SHAVAROVA, Volodymyr HALIAN</i>	
OPTICAL THERMOSENSORS BASED ON THE GLASSES $\text{Er}_2\text{S}_3\text{-Ag}_{0,05}\text{Ga}_{0,05}\text{Ge}_{0,95}\text{S}_2$	114
<i>Tetiana YATSYNIUK, Volodymyr HALYAN, Andrii KEVSHYN, Hanna SHAVAROVA, Vitaly ARTYUKH, Bohdan SVITLIKOVSKIY</i>	
OPTICAL ABSORPTION OF GLASSES IN THE $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-GeS}_2\text{-Sb}_2\text{S}_3$ SYSTEM DOPED WITH Er AND Nd.....	120

ФІЗИКА ТА ОСВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Випуск 1

Коректура • Ірина Миколаївна Чудеснова

Комп'ютерна верстка • Андрій Олександрович Філатов

Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman. Підписано до друку: 02.05.2025.
Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 15,11. Замов. № 0625/493. Наклад 300 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 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.