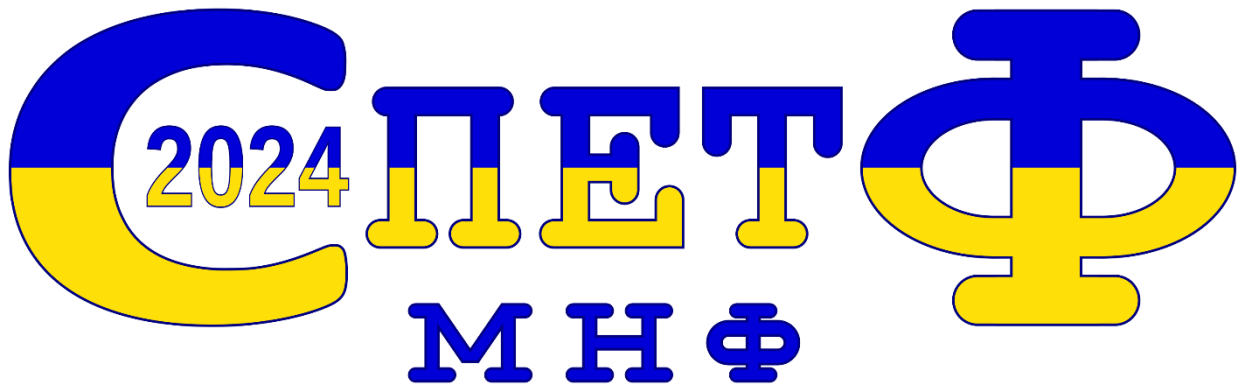


ISSN 2521-6996

Національна академія наук України  
Інститут прикладної фізики  
Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського»



***СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ  
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ,  
ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ  
ТА МЕТОДИКИ НАВЧАННЯ ФІЗИКИ***

**МАТЕРІАЛИ  
Х Всеукраїнської науково-практичної конференції  
з міжнародною участю**

**15–17 квітня 2024 року  
м. Суми**

**Національна академія наук України  
Інститут прикладної фізики  
Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського»**

**СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ,  
ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ  
ТА МЕТОДИКИ НАВЧАННЯ ФІЗИКИ**

**Матеріали  
X Всеукраїнської науково-практичної конференції  
з міжнародною участю**

**(Суми, 15-17 квітня 2024 року)**

За редакцією кандидата фізико-математичних наук, наукового співробітника  
Інституту прикладної фізики НАН України С. О. Лебединського

Суми  
2024

Рекомендовано вченою радою Інституту прикладної фізики НАН України  
(протокол №5 від 24.04.2024 р.)

**Упорядник:** Лебединський С. О., кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Інституту прикладної фізики НАН України

**Рецензенти:**

**Холодов Р. І.** – доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України, в.о. директора Інституту прикладної фізики НАН України.

**Салтикова А. І.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри математики, фізики та методик їх навчання СумДПУ імені А. С. Макаренка.

**М 34** Сучасні проблеми експериментальної, теоретичної фізики та методики навчання фізики: матеріали X Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю, м. Суми, 15-17 квітня 2024 року / за ред. С. О. Лебединського – Суми: ІПФ НАН України, 2024. – 95 с.

У збірнику подані матеріали X Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Сучасні проблеми експериментальної, теоретичної фізики та методики навчання фізики». У тезах представлені результати теоретичних і експериментальних досліджень.

Для наукових співробітників, викладачів навчальних закладів освіти, аспірантів та студентів.

Матеріали подаються в авторській редакції.

Відповідальність за достовірність інформації, автентичність цитат, правильність фактів, посилань несуть автори.

© Лебединський С. О., 2024

© ІПФ НАН України, 2024

## ЗМІСТ

<b>OVERVIEW AND TECHNOLOGIES OF ADVANCED NUCLEAR REACTORS</b> Kul'ment'ev A. I. ....	7
<b>PLASMA LENS, REDUCING ENERGY SPREAD OF GAUSSIAN-KIND BUNCHES IN BLOWOUT AND LINEAR REGIMES</b> Demydenko I. V., Maslov V. I. ....	8
<b>CONSTRUCTION AND CALCULATION OF THE 2D FOURIER TRANSFORM FOR THE PHASE RETRIEVAL IN X-RAY PHASE CONTRAST IMAGING</b> Polishchuk A. V., Lebed O. A. ....	9
<b>POST-MORTEM ANALYSIS OF NIOBIUM AFTER HIGH VOLTAGE TEST IN CRYOGENIC TEMPERATURE</b> Profatilova Ia., Jacewicz M., Coman M., ....	10
<b>HIGH FREQUENCY ION SOURCE FOR COMPACT NUCLEAR MICROPROBE</b> Voznyi V. I., Ponomarev O. G., Rebrov V. A. ....	13
<b>МОДЕЛЮВАННЯ ДИФУЗІЇ КРАУДІОНА В ОЦК МЕТАЛАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОЦЕСУ ТИПУ ОРНШТЕЙНА–УЛЕНБЕКА</b> Алексенко О. В. ....	14
<b>ВЛАСИВОСТІ НАНОКОМПОЗИТУ НА ОСНОВІ ПТФЕ, АРМОВАНОГО МІКРОТА НАНОВОЛОКНАМИ SIC</b> Силенко П. М. Андрущенко Д. І., Якубів М. І., Горбань В. Ф., Солонін Ю. М. ....	15
<b>ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ З'ЄДНАННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД МАТЕРІАЛУ</b> ЗРАЗКА Белевець К. С., Степанова А. А., Мусієнко О. С. ....	16
<b>ДИНАМІКА ЛОКАЛЬНИХ ДЕФЕКТІВ КРАУДІОННОГО ТИПУ ПІД ВПЛИВОМ ТЕРМАЛЬНИХ ФЛУКТУАЦІЙ ТА ПРОСТОРОВИХ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ</b> Бистрик Ю. С. ....	18
<b>ЗАСТОСУВАННЯ РЕНТГЕНФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МІСЦЬ ПОХОДЖЕННЯ СИРОВИНИ КЕРАМІКИ</b> Бугай О. М., Білик В. М., Осадчий Є. М. ....	18
<b>ВПЛИВ РАДІАЦІЙНО-ІНДУКОВАНОГО НАСИЧЕННЯ ВАКАНСІЯМИ НА ФАЗОВЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ПЕРШОГО РОДУ В НАНОЧАСТИНКАХ МЕТАЛІВ ТА КЕРАМІКИ: ПРИКЛАДНА ТЕОРІЯ І МОДЕЛЮВАННЯ</b> Білогородський Ю. С., Шірінян А. С. ....	20
<b>СКЛО З ПАМ'ЯТОК КУЛЬТУРИ ЧЕРНЯХІВ-СИНТАНА-ДЕ-МУРЕШ ІЗ ЗІБРАННЯ СУМСЬКОГО ОБЛАСНОГО КРАЄЗНАВЧОГО МУЗЕЮ: ХАРАКТЕРИЗАЦІЯ МЕТОДОМ РЕНТГЕНФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛІЗУ</b> Бугай О. М., Білинська Л. І. ....	21
<b>МОДИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ ТАО-ЕЛДРУПА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКІСТІ АНІГЛЯЦІЇ ПОЗИТРОНА В ПОТЕНЦІАЛЬНІЙ ЯМІ</b> Ворона М. І., Лебедь О. А. ....	22

<b>РЕЗОНАНСНЕ УТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЇ ПАРИ ПРИ РОЗСПОВАННІ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ ФОТОНІВ НА ЦИРКУЛЯРНО-ПОЛЯЗОВАНОМУ ЛАЗЕРНОМУ ПОЛІ</b> Ворошило О. І., Недорешта В. М. ....	24
<b>ШЛЯХИ ФОРМУВАННЯ НАУКОВОГО СВИТОГЛЯДУ УЧНІВ ПРИ ВИВЧЕННІ ФІЗИКИ</b> Гаркавий М. С., Салтиков Д. І. ....	25
<b>ВИКОРИСТАННЯ ВІРТУАЛЬНИХ ЛАБОРАТОРІЙ З ФІЗИКИ: ПЕРЕВАГИ ТА МОЖЛИВОСТІ</b> Чкана Я. О., Глазько С. С. ....	26
<b>ДИДАКТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ФІЗИКИ У РОЗВИТКУ КРИТИЧНОГО МИСЛЕННЯ</b> Голубков В. М. ....	27
<b>ЗАЛЕЖНІСТЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТІВ КАРБОН-СМОЛА ВІД СКЛАДУ СМОЛИ ТА ЦИКЛУ ЇЇ ЗАСТИГАННЯ — ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД</b> Гусак А. В., Мусієнко О. С. ....	29
<b>ПОРІВНЯННЯ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ «АПАРАТ ІЛЗАРОВА - КІСТКА» ПРИ ВИПРОБУВАННІ НА СТИСК</b> Демешко Я. В., Дейлід Д. С., Іщенко О. А., Мусієнко О. С. ....	31
<b>ЛАБОРАТОРІЯ НЕЙТРОННОЇ ФІЗИКИ В РЖЕЖІ ТА ЇЇ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА МІКРОСТРУКТУРИ МАТЕРІАЛІВ В РАМКАХ ПРОЕКТУ NERNEWS</b> Дрозденко М. О. ....	33
<b>ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ФАЗОВОГО МЕТОДУ ДО АНАЛІЗУ СПЕКТРІВ ЧАСУ ЖИТТЯ ПОЗИТРОНІВ</b> Дудник А. Б., Крикля С. В. ....	34
<b>ВПЛИВ НАДКРИТИЧНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА СПІН-ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ЕФЕКТИ В ПРОЦЕСІ СИНХРОТРОННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ</b> Дяченко М. М., Новак О. П., Лебединський С. О., Лебединська Ю. С., Холодов Р. І. ....	36
<b>ПРОФЕСІЙНА СПРЯМОВАНІСТЬ УРОКІВ ФІЗИКИ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ КОМПЕТЕНТНОГО ВИПУСКНИКА</b> Жигуліна В. І. ....	37
<b>САМОСТІЙНА РОБОТА СТУДЕНТІВ КОЛЕДЖУ З ФІЗИКИ В СУЧАСНОМУ ІНФОРМАЦІЙНОМУ СЕРЕДОВИЩІ</b> Завражна О. М. ....	39
<b>РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ У НАВЧАЛЬНОМУ ПРОЦЕСІ З ФІЗИКИ</b> Іваненко М. В., Салтикова А. І. ....	41
<b>ПРИСКОРЮВАЛЬНА ТРУБКА ДЛЯ ПРОТОННО - ПРОМЕНЕВОЇ ЛІТОГРАФІЇ</b> Ігнат'єв І. Г., Колінько С. В., Пономар'єв О. Г., Ребров В. А. ....	42
<b>ОПТИМІЗАЦІЯ ФОРМИ КУЛЬШОВОГО ІМПЛАНТУ</b> Іщенко В. А., Вялітов І. Д., Іщенко О. А., Мусієнко О. С. ....	44
<b>ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ З ФІЗИКИ ЯК МЕТОД ФОРМУВАННЯ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ КУЛЬТУРИ УЧНІВ</b> Каленик М. В., Гриценко Р. О. ....	46
<b>ВИКОРИСТАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ФІЗИЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ В УМОВАХ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ</b> Каленик М. В., Кочмала О. С. ....	47

<b>МЕТОДИКИ ТЕРМОДЕСОРБЦІЙНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВОДНЮ У МАТЕРІАЛАХ</b> Калінкевич О. М., Чіванов В. Д., Запорожець В. К., Новіков С. В., Калінкевич О. В., Данильченко С. М. ....	48
<b>ДОМАШНІЙ ФІЗИЧНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ В СУЧАСНИХ УМОВАХ</b> Карпенко А. О., Салтикова А. І. ....	49
<b>ВПЛИВ БАГАТОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ ЕЛЕКТРОДІВ НА ВИНИКНЕННЯ ВИСОКОВАКУУМНИХ ПРОБОЇВ</b> Карпенко О. Ю., Батурін В. А., Росенко О. Ю. ....	50
<b>ФІЗИКА У ПРОФІЛЬНОМУ ЗАКЛАДІ СЕРЕДНЬОЇ ОСВІТИ (ПОГЛЯД МАТЕРІАЛОЗНАВЦЯ)</b> Кислюк В. В., Трачевський В. В. ....	51
<b>МОДЕРНІЗОВАНИЙ АЛГОРИТМ КАЛІБРУВАННЯ МАНОМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТИПУ ПМТ-2, ПМТ-4М, СК-ТП4</b> Коломієць В. М., Кравченко С. М., Канівець В. М. ....	53
<b>РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІАЦІЙНО ІНДУКОВАНОЇ СЕГРЕГАЦІЇ МЕТОДОМ РІХЕ</b> Крикля С. В., Білик В. М., Сторіжко В. Ю. ....	54
<b>РОЛЬ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВКРАПЛЕНЬ У ПОЛЬОВИЙ ЕМІСІЙНИЙ СТРУМ З КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИСКОРЮВАЧІВ</b> Лебединська Ю. С., Лебединський С.О., Холодов Р. І. ....	55
<b>ДОСЛІДЖЕННЯ ШИРИНИ РЕЗОНАНСНОГО ПІКУ КОЕФІЦІЄНТА ПРОЗОРОСТІ ПОТЕНЦІАЛЬНОГО БАР'ЄРУ У ВИПАДКУ МОДИФІКОВАНОЇ ПОВЕРХНІ МЕТАЛУ</b> Лебединський С.О., Лебединська Ю. С., Холодов Р. І. ....	57
<b>ПРОСТОРОВА КОГЕРЕНТНІСТЬ КОМПАКТНИХ ДЖЕРЕЛ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ</b> Лебедь О. А., Овчаренко А. Ю., Стародуб С. С. ....	58
<b>МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМУВАННЯ МІКРОСТРУКТУРИ У СПЛАВАХ Fe-Cr-Al</b> Лисенко Б. О., Харченко Д. О., Харченко В. О. ....	59
<b>ПЕРСПЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ З ТАНАЛУ ДЛЯ УМОВ ЦИКЛІЧНИХ ТЕРМІЧНИХ ТА МЕХАНІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ</b> Луговський В. О , Коломієць В. М., Кравченко С. М. ....	60
<b>ПИТАННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ ЩОДО ПОШИРЕННЯ ЗВУКУ ТА СВІТЛА</b> Лук'янов П. В. ....	62
<b>ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ДЕТЕКТОРУ КАНАЛУ МІКРОЗОНДУ ІПФ НАН УКРАЇНИ</b> Магілін Д. В, Колінько С. В. ....	64
<b>ДЕЯКІ АСПЕКТИ МЕТОДИКИ НАВЧАННЯ ФІЗИКИ СТУДЕНТІВ БІОТЕХНОЛОГІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ</b> Маринченко Л. В., Ніжельська О. І. ....	65
<b>ВПЛИВ ДОВЖИНИ НІЖКИ ІМПЛАНТА НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН СИСТЕМИ «КІСТКА-РЕВІЗІЙНИЙ ІМПЛАНТ»</b> Моргун О. І., Черемшук Р. В., Мусієнко О. С. ....	67
<b>НАБЛИЖЕННЯ ДЛЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ЕЛІПТИЧНИХ ФУНКЦІЙ У СТАНДАРТНІЙ ТЕОРІЇ ТУНЕЛЮВАННЯ ФАУЛЕРА-НОРДГЕЙМА ДЛЯ БАР'ЄРА ШОТТКІ-НОРДГЕЙМА</b> Мусієнко І. І. ....	68

<b>ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ЕФЕКТИ В ПРОЦЕСІ НАРОДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЇ ПАРИ ФОТОНОМ В ПОЛІ ЛАЗЕРНОЇ ХВИЛІ</b> Недорешта В. М. .	70
<b>НЕДИПОЛЬНІ ЕФЕКТИ ПРИ ЗБУДЖЕННІ ВАЖКОГО ВОДНЕПОДІБНОГО ІОНУ ЛАЗЕРНИМ ІМПУЛЬСОМ</b> Новак О. П., Дяченко М. М., Холодов Р. І. ....	72
<b>ЗАСТОСУВАННЯ РЕНТГЕНІВСЬКОЇ ДИФРАКЦІЇ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТРИВИМІРНИХ ОБ'ЄКТІВ</b> Овчаренко А. Ю., Лебедь О. А. ....	74
<b>СКАНУЮЧИЙ СТІЛ ТРИМАЧА ПІДКЛАДОК ДЛЯ ВАКУУМНОЇ КАМЕРИ ВУП-5М</b> Коломієць В. М., Павленко Ю. А., Ігнатенко С. М., Кравченко С. М., Гончаренко О. І. ....	76
<b>ВПЛИВ МАЛИХ ВІДХИЛЕНЬ МАГНІТНОГО МОМЕНТУ ВІД ОСІ АНІЗОТРОПІЇ НА ПОГЛИНАННЯ ЕНЕРГІЇ ЗМІННОГО ПОЛЯ ФЕРОМАГНІТНОЮ НАНОЧАСТИНКОЮ В РІДИНІ</b> Павлюк М. О. ....	77
<b>МОТИВУВАННЯ УЧНІВ ДО НАВЧАЛЬНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ З ФІЗИКИ ЗА УМОВ ДИСТАНЦІЙНОГО ТА ЗМІШАНОГО НАВЧАННЯ</b> Пасько О. О., Посенко А. В. ....	78
<b>ПРОБЛЕМА УЗАГАЛЬНЕННЯ ТА СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ЗНАТЬ УЧНІВ З ФІЗИКИ</b> Проїдисвіт Д. О., Салтикова А. І. ....	80
<b>ЕЛЕМЕНТИ БІОФІЗИКИ В ОСВІТНЬОМУ ПРОЦЕСІ З ФІЗИКИ</b> Пушкар І. В., Салтиков Д. І. ....	81
<b>ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІОННОГО ПУЧКА В ДЖЕРЕЛІ НЕГАТИВНИХ ІОНІВ ВОДНЮ</b> Батурін В. А., Росенко О. Ю., Литвинов П. О., Карпенко О. Ю. ....	82
<b>МЕТОД МАЛОКУТОВОГО РОЗСІЯННЯ НЕЙТРОНІВ (МРН) ДЛЯ ВИВЧЕННЯ НАНОВКЛЮЧЕНЬ У ІНЖЕНЕРНИХ МАТЕРІАЛАХ</b> Рюхтін В. В. ....	84
<b>ПІЗНЯ СТАДІЯ СЕГРЕГАЦІЇ ДОМІШКИ НА МІЖЗЕРЕННІЙ МЕЖІ У ВИПАДКУ УТВОРЕННЯ СФЕРИЧНИХ ВИДІЛЕНЬ НОВОЇ ФАЗИ, РІСТ ЯКИХ ЛІМІТУЄТЬСЯ ПОВЕРХНЕВОЮ КІНЕТИКОЮ.</b> Коропов О. В., Скороход Р. В. ....	85
<b>ЗАСТОСУВАННЯ ЗАСОБІВ МОБІЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПІД ЧАС ВИВЧЕННЯ ФІЗИКИ</b> Стома В. М. ....	87
<b>ОПАНУВАННЯ ПРИРОДНИЧИХ НАУК ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ЕЛЕМЕНТ МЕДИЧНОЇ ОСВІТИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТРАНДИСЦИПЛІНАРНOSTІ.</b> Федів В. І., Олар О. І., Бірюкова Т. В. ....	90
<b>ВПЛИВ РАДІАЦІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА ЮПІТЕРА НА СУПУТНИКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ОПРОМІНЕННЯ ЇХ ПОВЕРХНІ.</b> Фоміна А. П., Новак О. П., Холодов Р. І., Маслов В. І. ....	91
<b>ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ В ОСВІТІ.</b> Чечіль Т.Ю., Салтикова А.І. ....	92
<b>ЕЛЕКТРОННИЙ МОЗКОВИЙ ШТУРМ ЯК ЗАСІБ РОЗВИТКУ ІНФОРМАЦІЙНО-ЦИФРОВОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ УЧНІВ НА УРОКАХ ФІЗИКИ.</b> Шищенко І. В., Юрченко В. І. ....	93

## **OVERVIEW AND TECHNOLOGIES OF ADVANCED NUCLEAR REACTORS**

***Kul'ment'ev A. I., Doctor of Physics and Mathematics, Senior research assistant,  
Leading Researcher,  
Institute of Applied Physics of the NAS of Ukraine, Sumy, Ukraine***

Most nuclear power throughout of the world is generated by light water reactors (LWRs), which were commercialized in the 1950 s. LWRs are cooled by ordinary water (H<sub>2</sub>O), which also slows the neutrons that maintain the nuclear fission chain reaction. High construction costs of large standard LWRs, concerns about safety raised by the nuclear disaster in the 2011 (Japan Fukushima) have led to increased interest in unconventional, or "advanced", nuclear technologies that could be less expensive and safer than existing LWRs.

An "advanced nuclear reactor" was defined in legislation enacted in 2018 (DOE, USA) as "a nuclear fission reactor with significant improvements over the most recent generation of nuclear fission reactors". Such reactors include LWR that would use different moderators, coolants, and types of fuel or a reactor using nuclear fusion. Besides these designs would include small modular reactors (SMRs), which the DOE defines as reactors with electric generating capacity of 300 megawatts and below [1].

Advanced reactors are often referred to as "Generation IV" nuclear technologies, with existing commercial reactors constituting "Generation III, III<sup>+</sup>". Major categories of advanced reactors include:

- advanced water-cooled reactors, which would make safety, efficiency, and other improvements over existing commercial reactors;
- gas-cooled reactors, which could use graphite as a neutron moderator or have no moderator;
- liquid-metal-cooled reactors, which would be cooled by liquid sodium or other metals and have no moderator;
- molten salt reactors, which would use liquid fuel; and
- fusion reactors, which would release energy through the fusion of light atomic nuclei rather than the splitting (fission) of heavy nuclei.

Despite most of these concepts have been studied since the beginning of the nuclear age, only relatively few of them have advanced to commercial scale demonstration. Ones of the most advanced are sodium-cooled reactors, and such demonstrations in the United States took place decades ago. It should be pointed that Sodium-cooled Fast Reactors (SFRs) along with High Temperature Gas Reactors (HTGRs) are among the most technologically mature of the unconventional nuclear concepts.

SFRs use fast reactor technology with liquid sodium as the primary coolant. The use of a liquid metal as the coolant allows the primary coolant circuit to operate under near-atmospheric pressure conditions. In addition, even in an emergency without backup electricity, very high heat-transfer properties of liquid sodium (100 times greater than water) would allow for passive cooling through natural circulation. The SFR coolant outlet would have a temperature of 500-550°C. This lower temperature (compared to the other Generation IV reactors) would allow for the use of materials that have been developed and proven in prior fast reactors. SFRs come in two main design variants. In the pool-type SFR (see figure) the reactor core and primary heat exchanger are immersed in a single pool of liquid metal, while the loop-type houses the primary heat exchanger in a separate vessel. SFR technologies are conducive to modularization.

A disadvantage that has been raised about using sodium as a coolant is that it reacts violently with both water and air. As a result, the primary sodium coolant system (which contains highly radioactive sodium) is often isolated from the steam generation system by an intermediary coolant to prevent a release of radioactivity in the case of an accident. This adds complexity & costs to the system, complicates maintenance and refueling, and introduces an additional safety concern. Fires resulting from sodium leaks have caused shutdowns in several SFRs that have been built to date.

Fusion reactors would fuse light atomic nuclei – as opposed to the fissioning of heavy nuclei – to produce power. Fusion R&D has received significant R&D investment, including over \$20 billion in international cooperative funding anticipated to build the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), a fusion research and demonstration reactor under construction in France. Fusion power would require light atoms, generally isotopes of hydrogen, to be heated to 100 million degrees to form a plasma. Holding the plasma together while it is heated sufficiently

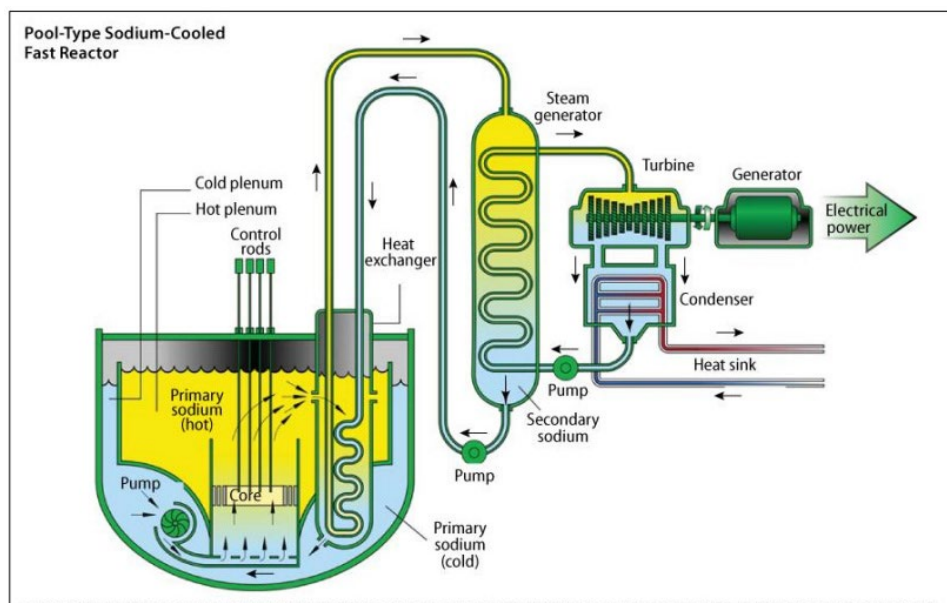


Fig. 1. Pool-Type Sodium-Cooled Fast Reactors [1].

"burning plasma", in which energy produced by fusion at least equals the energy needed to heat the plasma.

ITER is scheduled to produce its first plasma by the end of 2025, with full operations, including burning plasma experiments, scheduled to begin in 2035.

According to the Fusion Industry Association, "fusion produces no harmful emissions or waste fuel. A fusion power plant is physically incapable of having a meltdown. There is no fissile radioactive waste left over". However, some reactor materials would be made radioactive by neutron exposure although far less so than fission products.

Thus, the work considered the current state of research in the field of unconventional nuclear energy, which will facilitate the choice of a path for the development of carbon-free energy in Eastern Europe and in particular strategy for its development in Ukraine.

## References

[1] M. Granger Morgan et al., "US Nuclear Power: The Vanishing Low-Carbon Wedge," Proceedings of the National Academy of Sciences **115**, no. 28 (July 10, 2018): 7184 – 89.

## ***PLASMA LENS, REDUCING ENERGY SPREAD OF GAUSSIAN-KIND BUNCHES IN BLOWOUT AND LINEAR REGIMES***

***Demydenko I. V.<sup>1,2</sup>, student; Maslov V. I.<sup>1,2,3</sup>, Dr.Sc., professor***

<sup>1</sup> V.N.Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup> NSC Kharkiv Institute of Physics and Technology, Kharkiv, Ukraine

<sup>3</sup> DESY, Hamburg, Germany

*vmaslov@kipt.kharkov.ua*

Acceleration by the wakefield in the plasma can provide compact sources of relativistic electron beams of high brightness. Free electron lasers and particle colliders, using plasma

wakefield accelerators, require high efficiency and beams with low energy spread. Focusing of electron and positron bunches in plasma are important (see [1-8]). In this report, we present results of numerical simulation the focusing of Gaussian-kind bunches by a plasma lens depending on their length, shape and regime of plasma lens. We have shown that for a homogeneous focusing field and to prevent loss of energy from bunches, the presence of an electron bunch-precursor is necessary. This plasma lens decreases the energy spread of bunches in blowout and linear regimes, since the first front of the bunch, which is of more energy, is in decelerating field, and its back front, which is of smaller energy, is in accelerating field. We demonstrate the bunch focusing with time in blowout and linear regimes of wakefield.

### References

- [1] J.B. Rosenzweig et al, "Acceleration and Focusing of Electrons in Two-Dimensional Nonlinear Plasma Wake Fields" Phys. Rev. A, v. 44 (N10), p. R6190- R6192, 1991.
- [2] C. O'Connell et al, "Dynamic focusing of an electron beam through a long plasma" Phys. Rev. ST Accel. Beams, v. 5, p. 121301, 2002.
- [3] M.C. Tompson et al, «Observations of low-aberration plasma lens focusing of relativistic electron beams at the underdense threshold" Phys. Plasmas, v. 17, p. 073105, 2010.
- [4] M. J. Hogan et al, "Ultrarelativistic-Positron-Beam Transport through Meter-Scale Plasmas" Phys. Rev. Lett., v. 90 (20), p. 205002, 2003.
- [5] M. Reiser, H. Li, "Solutions of the matched KV envelope equations for a "smooth" asymmetric focusing channel" J. Appl. Phys., v. 96 (N1), p. 784-790, 2004.
- [6] V. I. Maslov et al, "Plasma Wakefield Excitation, Possessing of Homogeneous Focusing of Electron Bunches" Problems of Atomic Science & Technology, v. 1, p. 134-36, 2013.
- [7] V. I. Maslov et al, "Fields excited and providing a uniform focusing of short relativistic electron bunches in plasma" East European Journal of Physics, v. 2, p. 92-95, 2014.
- [8] S. Diederichs et al, "Stable electron beam propagation in a plasma column" Phys. Plasmas, v. 29, p. 043101, 2022.

## **CONSTRUCTION AND CALCULATION OF THE 2D FOURIER TRANSFORM FOR THE PHASE RETRIEVAL IN X-RAY PHASE CONTRAST IMAGING**

***Polishchuk A.V., Junior Researcher, Lebed O.A., Dr.Sci., Senior Researcher***

*Institute of Applied Physics National Academy of Sciences of Ukraine, Sumy, Ukraine*

As of today, the progress of optical-electronic detector devices does not allow direct recording of the X-ray phase, because the time period according to Nyquist-Shannon discretization, with a characteristic frequency  $f \sim 10^{18}$  Hz, should be  $T_{discr} \sim 10^{-19}$  seconds.

Advanced detector technologies were recently demonstrated at the SPB/SFX (Single Particles, Clusters and Biomolecules and Serial Femtosecond Crystallography) experimental line of the European X-ray Free Electron Laser (EuXFEL), for which an indirect scintillation detector was developed in combination with a CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) MHz sensor. As a result of such Mhz-sampling, temporal microsecond and spatial micrometer resolution was demonstrated during visualizing of liquid jets with an initial speed of 850 m/s, which are expected to be used in needleless medicament-delivery injections [1].

Consequently, the problem of measurement of the spatial distribution of the phase of the wave field comes up, since the direct registration of the X-ray phase is experimentally impossible. This problem of registering the intensity of the high-frequency radiation is known as an inverse problem and in the general case has many solutions. In the X-ray range, for quantitative analysis, the task to be solved simplifies significantly, when some assumptions are met and applied regarding inner characteristics of the object under the investigation as well as regarding probing radiation [2].

The purpose of this work is analytical calculations of radiation propagation through the investigated substance and through the free space and numerical calculation of the projected thickness of a homogeneous and two-component object during coherent visualization using the opticless method of in-line X-ray phase contrast imaging.

We had modified the algorithm based on the transport of intensity equation (1) in the context of the phase retrieval problem [3] in order to calculate the projected thickness  $T(x, y)$  of a single-material sample by expansion of the initial conditions (2) for  $I(x, y, 0)$ :

$$\nabla_{\perp}[I(x, y, z)\nabla_{\perp}\varphi(x, y, z)] = -k\frac{\partial I(x, y, z)}{\partial z}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \varphi(x, y, 0) = -k\delta T(x, y), \\ I(x, y, 0) = I_0(x, y)e^{-\mu T(x, y)}, \end{cases} \quad (2)$$

where  $\nabla_{\perp}$  is the gradient operator in the plane  $(x, y)$ , which is perpendicular to the  $z$ -direction;  $I$  is the intensity distribution;  $\varphi$  is the phase of the probing beam;  $\mu$  is linear attenuation coefficient of the object substance;  $k$  is the angular wavenumber;  $\delta$  is the decrement from unity of the X-ray 3D refractive index  $n$ :

$$n(x, y, z) = 1 - \delta(x, y, z) + i\beta(x, y, z).$$

The formula for calculating the anticipated thickness using the registered intensity by the detector placed at a certain distance  $R_2$  downstream the object under a study is obtained:

$$e^{-\mu T(x, y)} = \frac{I(x, y, R_2)}{\left\{ \frac{-R_2\delta}{\mu} \nabla_{\perp}(I_0(x, y))\nabla_{\perp} + I_0(x, y) \left[ 1 - \frac{R_2\delta}{\mu} \nabla_{\perp}^2 \right] \right\}}. \quad (3)$$

For the numerical calculation of  $T(x, y)$  in Eq.(3) it is planned to use the 2D integral Fourier transformation method [3]. An analysis of the formation in the frequency domain of an associative two-dimensional array representing the corresponding Fourier plane was carried out for more efficient calculations. The dependence (Fig. 1) between conjugate coordinates in the frequency domain for the fixed experimental parameters [4] of the detector (pixel size was 0.65  $\mu\text{m}$  and number of pixels  $N=2048$ ) was established.

### References

- [1] P. Vagovič et al., *Optica* Vol. 6, Issue 9, pp. 1106-1109 (2019).
- [2] A. Burvall et al., *Opt. Express* 19, pp. 10359-10376 (2011).
- [3] D. Paganin et al., *Journal of Microscopy*, Vol. 206, Pt 1 (2002).
- [4] K. Medjoubi et.al., *Microsc. Microanal.* 24(Suppl. 2), 252 (2018).

### **POST-MORTEM ANALYSIS OF NIOBIUM AFTER HIGH VOLTAGE TEST IN CRYOGENIC TEMPERATURE**

***Profatilova Iaroslava, Research Engineer; Jacewicz Marek, Researcher;  
Coman Mircea-George, PhD student***

*FREIA laboratory, Department of Physics and Astronomy, Uppsala University,  
Uppsala, Sweden*

The cryogenic test-stand is operated in FREIA (Facility for Research Instrumentation and Accelerator development) laboratory in Uppsala, Sweden to investigate the fundamental mechanisms of field emission and electrical breakdown phenomena on metal surfaces. It performs the high-voltage test up to 10 kV with the temperature range down to 4 K allowing for test of even the superconductive materials. Recently a couple of niobium electrodes was tested at the system in Uppsala at 4 K. The electrodes were assembled with 40  $\mu\text{m}$  ceramic spacer (note that the gap extends to ca. 66  $\mu\text{m}$  gap at cryo conditions) [1]. The conditioning was done with HV pulses with rectangular shape and 1  $\mu\text{s}$  width with the repetition rate up to 1 kHz. Field emission measurements were done at several points in different stages of the conditioning.

The first breakdown occurred at 81 MV/m. During cold conditioning, a maximum of above 150 MV/m electric field was reached. In total above 4000 BDs were registered over more than 3 billion of pulses.

The post-mortem inspection under light microscope was done. Microscopic analysis of breakdown features on anode and cathode was conducted using the SmartScope FLASH 200 light microscope. The inspection under light microscope revealed a uniform distribution of breakdown features. The individual scans were stitched to form comprehensive maps. Larger map analysis made by using a dedicated MATLAB script, similar to [2, 3] employing an automatic circle-finding routine. The resulting coordinates were linked between anode and cathode images using semi-manual methods, establishing transformation factors for direct anode-cathode feature comparison during analysis. 1500 breakdown features were chosen for the analysis (fig. 1).

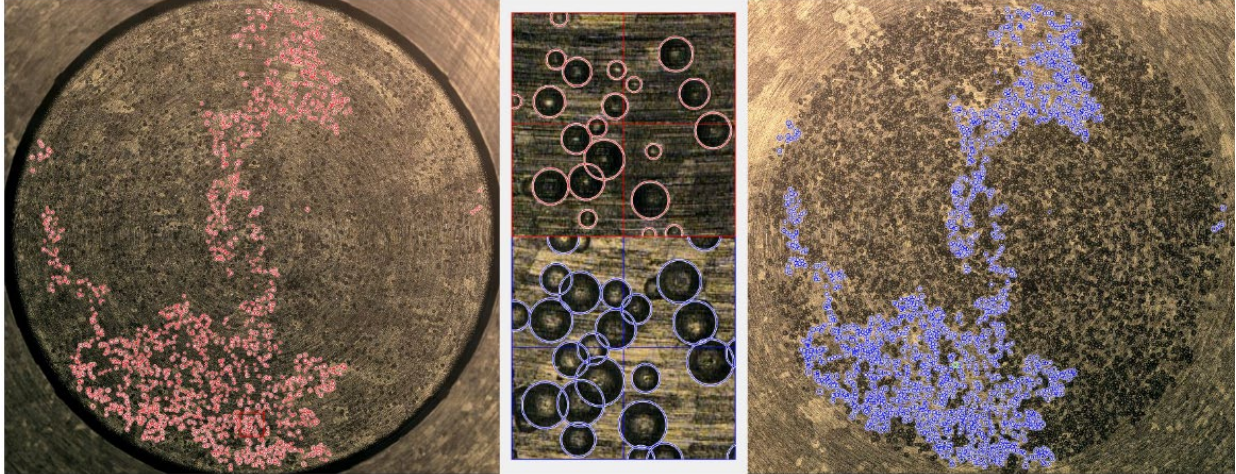


Fig. 1. The screenshot of BD feature counting using MATLAB script on 066 Nb rm1 electrodes (the anode is shown on the left, the cathode - on the right).

Fig. 2 shows the distribution of breakdown features radii sizes for anode (red) and for the cathode (blue). The anode radii ( $r_a$ ) is between 40 and 150  $\mu\text{m}$  (smaller that this was difficult to identify on the microscopic picture) and the mean value is  $88 \pm 31 \mu\text{m}$ . The breakdown features on cathode ( $r_c$ ) have radii sizes from 20 to 230  $\mu\text{m}$  with the mean value  $146 \pm 28 \mu\text{m}$ . Commonly (97% from our data set), cathode features are larger than anode' and the ratio  $r_c/r_a$  is  $1.75 \pm 0.3$ . There are also some cases that the anode breakdown features hardly visible or invisible and we didn't count them. Generally, the size of breakdown features increases with higher electric field strength [4].

For the rest uncommon breakdown features (3% from our data set), the anode features are bigger than on the cathode and in our case ratio  $r_c/r_a$  is  $0.52 \pm 0.14$ .

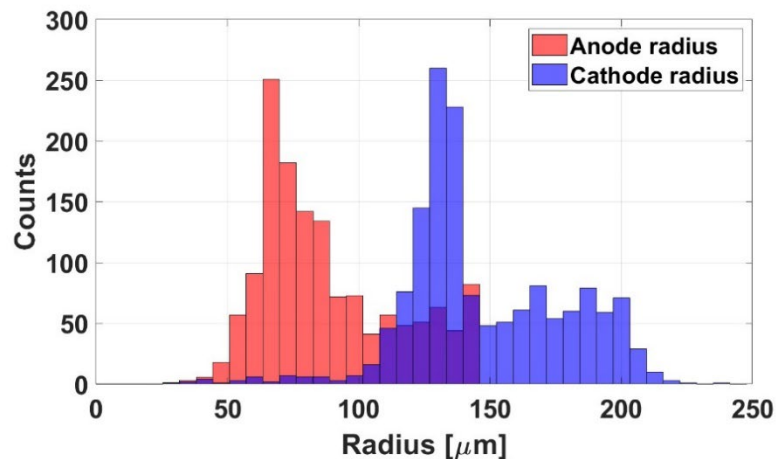


Fig. 2. The distribution of the breakdown features sizes: on anode (in red) and on cathode (in blue).

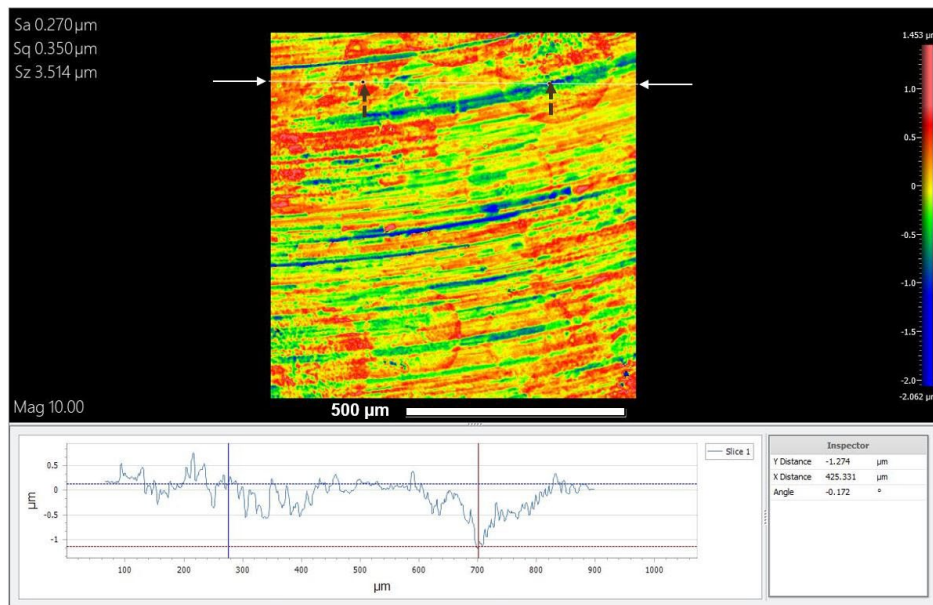


Fig. 3. The image from optical profilometer of some chosen area with a BD spot on niobium cathode.

A surface topography of niobium cathode was checked using optical profilometer after the test in order to qualify its roughness (see fig. 3). The BD spot inspection revealed the depth of the crater up to 1.5 μm which is comparable to the depth of the BD spot on copper tested in similar conditions. We also investigated grooves left on surface after machining and measured many ranging down to 2 μm, which is significantly larger than the roughness on diamond machined copper samples (25 nm) [5].

However, despite this substantial difference, the BD spots are evenly distributed over the surface and the grooves size do not show correlation with BD locations. This is an important finding that may allow us to relax the stringent constraints on the manufacturing process for the accelerating structures, thus reducing significantly the time and price for the future accelerators.

### References

- [1] M. Jacewicz, J. Eriksson, R. Ruber, S. Calatroni, I. Profatilova, W. Wuensch, Temperature-dependent field emission and breakdown measurements using a pulsed high-voltage cryo system, Phys. Rev. Applied 14, 061002 – 2020. (<http://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.061002>)
- [2] I. Profatilova, X. Stragier, S. Calatroni, E. Rodriguez Castro, A. Kandratsyev, W. Wuensch, Breakdown localisation in a pulsed DC electrode system, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 953, 163079 – 2020. (<https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.163079>)
- [3] I. Profatilova, M. Jacewicz, Piotr Szaniawski, Inna Popov, Yinon Ashkenazy, Performance of electrical vacuum breakdown under cryogenic temperatures // 10th International Workshop on Mechanisms of Vacuum Arcs, September 18-22, 2022, Chania, Crete, Greece. (<https://indico.cern.ch/event/1099613/contributions/4969654/>)
- [4] I. Profatilova, Recent progress at pulsed dc systems at CERN // 8th International Workshop on Mechanisms of Vacuum Arcs, September 15-19, 2019, Padova, Italy. (<https://indico.cern.ch/event/774138/timetable/?view=standard#105-recent-progress-at-pulsed>).
- [5] I. Profatilova, W. Wuensch, S. Calatroni, Behaviour of copper during initial conditioning in the pulsed DC system. CERN-ACC-2019-0058; CLIC-Note-1145. – 2019. – 10 p. (<https://cds.cern.ch/record/2703709/files/CERN-ACC-2019-0058.pdf>)

## **HIGH FREQUENCY ION SOURCE FOR COMPACT NUCLEAR MICROPROBE**

**Voznyi V.I., PhD in Physics and Mathematics; Ponomarev O.G., Doctor of Physics and Mathematics, Professor; Rebrov V.A., PhD in Physics and Mathematics.**

*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Sumy, Ukraine.*

A plasma high-frequency (HF) inductive low-power ion source has been developed. The source is intended for use in a compact nuclear microprobe [1] as a source of H<sup>+</sup> ion species.

HF ion sources are widely used for generating ion beams [2, 4]. Their characteristic feature is simplicity of construction, absence of incandescent cathodes, and purity of the obtained plasma.

The extracted ion current is proportional to the HF power supplied to the source. As a proton beam current of up to 1 nA is sufficient for a compact nuclear microprobe, it becomes feasible to design an HF ion source with small dimensions and low HF power. This facilitates temperature control of the source and reduces high-frequency electromagnetic interference for equipment and personnel.

The HF ion source contains a cylindrical quartz bulb with an outer diameter of 34 mm and a length of 70 mm, surrounded by 7 turns of a copper wire coil with a diameter of 4 mm. A HF voltage at a frequency of 40 MHz is applied to the coil. Inside the quartz bulb, there is hydrogen gas at a pressure of 0.1–1 Pa. The alternating magnetic field of the coil induces an azimuthal HF electric field, the energy of which is absorbed by electrons inside the gas volume. The oscillating electrons excite and ionize the gas particles, creating plasma. The resulting positive hydrogen ions are extracted from the source chamber by an extraction and focusing system, forming an ion beam.

Characteristic parameters of the source include:

- HF power: Less than 10 W
- Frequency: 40 MHz
- Extraction hole diameter: 0.6 mm
- Ion beam current: Less than 1 μA
- Beam energy: Up to 7 keV
- Extraction voltage: 50 V.

The report summarizes the results of measuring various parameters of the ion source in different operating modes. The following characteristics have been measured:

1. Volt-ampere characteristics of the ion source.
2. Ion beam current.
3. Temporary stability of the beam current.
4. Mass composition of the ion beam.
5. Preliminary measurements of the ion energy spread were conducted.

The mass composition of the ion beam was determined using a Wien filter. The ion energy spread of the beam was measured using a grid energy analyzer with the method of retarding potential [3, 4]. Preliminary measurements showed that the ion energy spread does not exceed 20 eV.

The results obtained from testing the HF ion source indicate its promising potential for application in a compact nuclear microprobe. The design of such a microprobe is planned to be undertaken at the Institute of Applied Physics of the NAS of Ukraine.

### **References**

- [1] D. Magilin, A. Ponomarev, V. Rebrov, A. Ponomarov, High-voltage scanning ion microscope: Beam optics and design. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 350 (2015), pp. 32-35. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.03.032>

## МОДЕЛЮВАННЯ ДИФУЗІЇ КРАУДІОНА В ОЦК МЕТАЛАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОЦЕСУ ТИПУ ОРНШТЕЙНА–УЛЕНБЕКА

Алексенко О. В.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., н.с.

<sup>1</sup> Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

Робота різних конструкцій ядерних енергетичних установок здійснюється в умовах опромінення та супроводжується зміною теплофізичних, пружних та міцнісних характеристик конструкційних матеріалів. У зв'язку з цим виникає необхідність вивчати вплив радіаційного випромінювання на метали та сплави, який призводить до утворення краудіонів і може спричинити руйнування конструкційних матеріалів. Краудіон - це група атомів, стисла зазвичай уздовж напрямку щільної упаковки за рахунок наявності в ряду одного або декількох зайвих атомів. Дослідження впливу радіаційного випромінювання на метали та сплави потребує моделювання.

Зауважимо, що сенс моделювання полягає у заміні вихідного об'єкта його математичною моделлю. Ця математична модель має бути побудована на основі фізичних законів, яким підпорядковується необхідний нам процес або явище.

У даній роботі проведено комп'ютерне моделювання руху краудіона з метою визначення його коефіцієнта дифузії. Для опису відповідного стохастичного процесу розглянуто рівняння Ланжевена, яке моделює рух краудіона в зовнішньому потенціалі під дією броунівського шуму. У випадку експоненціальної кореляції відповідного гауссівського шуму найпростіше рівняння Ланжевена має вигляд [1]:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -m\gamma_0 \vec{v} + \vec{f}(t), \quad (1)$$

де  $m$  – ефективна маса краудіона,  $\vec{v}(t)$  – швидкість міграції краудіона,  $\gamma_0$  – коефіцієнт дисипативного тертя,  $\vec{f}(t)$  – випадкова теплова сила (шум), яка діє на краудіон з боку навколишніх атомів.

Коефіцієнт дисипативного тертя представлений у двох наближеннях – високотемпературному та низькотемпературному [1]. В одновимірному випадку найпростіший спосіб отримати експоненційно корельований кольоровий шум – замінити (1) парою рівнянь (2) [2].

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} = -\gamma_0 p + \varepsilon, \\ \frac{d\varepsilon}{dt} = -\lambda \varepsilon + \lambda \xi, \end{cases} \quad (2)$$

де  $p = mv$  – імпульс краудіона,  $\varepsilon$  – експоненційно корельований кольоровий шум,  $\lambda^{-1}$  – час кореляції кольорового шуму,  $\xi$  – гауссівський білий шум.

Схема скінченних різниць в безрозмірних змінних для системи рівнянь (2) набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \tilde{p}_k &= \tilde{p}_{k-1} - \Delta\tau \cdot \tilde{p}_{k-1} + \Delta\tau \cdot \tilde{\varepsilon}_{k-1}, \\ \tilde{\varepsilon}_k &= \tilde{\varepsilon}_{k-1} - \lambda t_0 \Delta\tau \cdot \tilde{\varepsilon}_{k-1} + \lambda \sqrt{t_0 \Delta\tau} \cdot \tilde{\eta}_{k-1}, \quad r_k = v_k \Delta t. \end{aligned} \quad (3)$$

У формулах (3) величина  $\tilde{p}$  – безрозмірний імпульс краудіона,  $\tilde{\varepsilon}$  – експоненційно корельований гауссівський кольоровий шум,  $\tilde{\eta}$  – випадкове число, яке розподілено за нормальним законом із нульовим середнім значенням,  $t_0 = 1/\gamma_0$ ,  $\tau$  – безрозмірний час,  $r_k$  – переміщення краудіона за один крок моделювання  $\Delta t$ .

Для розрахунку коефіцієнта дифузії використано відому формулу Ейнштейна:

$$D = \lim_{t \rightarrow \infty} D(t), \quad D(t) = \frac{\langle R^2(t) \rangle}{2t}, \quad (4)$$

де  $t$  – час спостереження;  $\langle R^2(t) \rangle = \frac{1}{n} \sum_i R_i^2(t)$  – дисперсія краудіона і  $R_i^2(t) = \sum_j r_j^2$ .

Аналітична формула для  $D(t)$  в залежності від часу спостереження має вигляд:

$$D(t) = \frac{1}{2t} \cdot \left\{ \frac{1}{\beta\alpha} \cdot \left[ 2\tau_n t - 2\tau_n^2 + 2\tau_n^2 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right) \right] - \frac{4\Gamma}{\beta\alpha\alpha\tau_n} \right\} \cdot \frac{\lambda I}{m^2}, \quad (5)$$

де  $\tau_n = \frac{1}{\lambda}$  – час кореляції кольорового шуму;  $I$  – інтенсивність кольорового шуму; а також

$$\beta = \gamma_0 - \frac{1}{\tau_n}; \alpha = \gamma_0 + \frac{1}{\tau_n}; a = 2\gamma_0; \Gamma = \frac{t}{\gamma_0} - \frac{1}{\gamma_0^2} + \frac{1}{\gamma_0^2} \cdot \exp[-\gamma_0 t].$$

Отримано наступні результати. На рис. 1 та рис. 2 представлено залежності коефіцієнту дифузії від часу руху краудіона, динаміка якого описується рівнянням Ланжевена (1) з експоненційно корельованим гауссівським шумом. Графіки  $D(t)$  прямують до константи. Видно, що результати чисельного моделювання гарно співпадають з аналітичною залежністю. Крім того, звернемо увагу що, при зменшенні температури коефіцієнт дифузії зміщується в область менших значень.

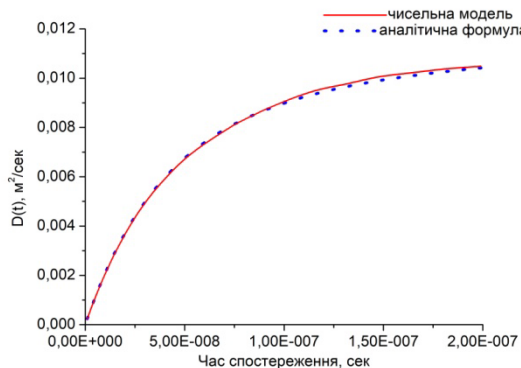


Рис. 1. Залежність  $D(t)$  від часу руху краудіона в високотемпературному наближенні,  $T=700$  К. Кількість реалізацій 10000.

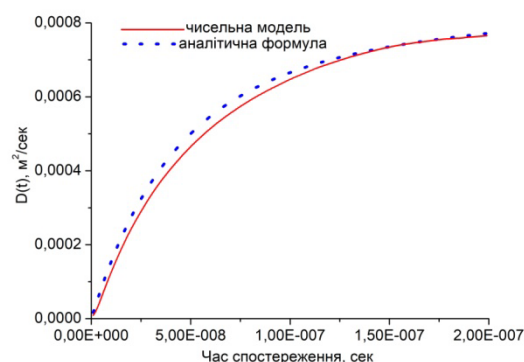


Рис. 2. Залежність  $D(t)$  від часу руху краудіона в низькотемпературному наближенні,  $T=50$  К. Кількість реалізацій 10000.

Як результат, розроблено програмний код для розв'язку широкого класу стохастичних диференціальних рівнянь. Розв'язано окремий випадок такого рівняння. Проведено дослідження поведінки коефіцієнту дифузії від параметрів моделі. Напрацьований матеріал буде застосовано для вирішення задач радіаційного матеріалознавства.

### Список використаних джерел

- [1] Dudarev S. L. «Thermal mobility of interstitial defects in irradiated materials». *Physical Review B*, 2002, V. 65, P. 224105.
- [2] Fox R. F., Gatland I. R., Roy R., Vemuri G. «Fast, accurate algorithm for numerical simulation of exponentially correlated colored noise». *Physical Review A*, 1988, 38(11), 5938 – 5940.

## ВЛАСИВОСТІ НАНОКОМПОЗИТУ НА ОСНОВІ ПТФЕ, АРМОВАНОГО МІКРО- ТА НАНОВОЛОКНАМИ SiC

Силенко П. М.<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с.; Андрущенко Д. І.<sup>1</sup>, м.н.с.; Якубів М. І.<sup>1</sup>; Горбань В. Ф.<sup>1</sup>, д.т.н., с.н.с.; Солонін Ю. М.<sup>1</sup>, д.ф.-м.н., академік НАНУ

<sup>1</sup> Інститут проблем матеріалознавства імені І. М. Францевича НАНУ, Київ, Україна

Значне підвищення механічних характеристик полімерних матеріалів, зокрема політетрафторетилену (фторопласту), досягається за рахунок використання різноманітних наповнювачів. Відомі антифрикційні матеріали на основі фторопласту, наповненого такими дисперсними порошками, як колоїдний графіт, дисульфід молібдену тощо. Із розвитком технологій виготовлення наноматеріалів, наприклад, тугоплавких сполук, з'явилась можливість суттєво розширити спектр наповнювачів фторопласту. Особливо цікавим об'єктом є нанотрубки та нановолокна. По-перше, вони зазвичай володіють дуже високими механічними характеристиками. По-друге, їх морфологія, екстремальні значення

відношення довжини до діаметру, висока питома поверхня роблять їх ідеальними добавками з точки зору суттєвого підвищення механічних характеристик композиту вже при їх незначній концентрації.

В пропонуваній роботі розглянуто створення композитів антифрикційного призначення типу фторопласт-мікро- та нановолокна SiC. Для цього використовували фторопластову суспензію Ф-4Д (ТУ 6-05-1246-81) та нановолокна, виготовлені в ІПМ НАН України. Для досягнення рівномірного розподілу мікро- та нановолокон SiC в матриці нанокompозиту, роботу проводили в такій послідовності. Спочатку дослідну партію армуючих волокон дезінтегрували шляхом розмелу у кульовому планетарному млині фірми Ретч, Німеччина, тип РМ 100. Млин дозволяє виконувати подрібнення і змішування при програмованих режимах щодо швидкості обертання та часу помелу. Подрібнені армуючі волокна змішували з суспензією фторопласту висушували та спікали при температурі 350 °С протягом 30 хвилин. Виготовлені зразки нанокompозиту містили 5, 10 та 15 масових відсотків SiC.

Рентгенографічні дослідження виконували на дифрактометрі ДРОН – 3М із комп'ютерною реєстрацією та обробкою даних. Використовували  $Cu K_{\alpha}$  випромінювання. На всіх дифрактограмах спостерігали три чіткі лінії на подвійних кутах відбиття 36, 60 і 72 градуси, які відносяться до кубічної фази  $\beta$ -SiC.

Дослідження методом трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) проводили на мікроскопі М -200 при прискорюючій напрузі 100 кВ. Аналіз ТЕМ – зображень свідчить про те, що в полімерній матриці знаходяться рівномірно розподілені волокна карбїду кремнію із розмірами від частини мікрона до сотні нанометрів.

Механічні властивості композитів на основі фторопласту в залежності від вмісту волокон карбїду кремнію визначали методом автоматичного індентування. Було встановлено, що збільшення вмісту волокон карбїду кремнію в композиті призводить до суттєвого зростання механічних характеристик. Так, мікротвердість збільшується від 0,042 ГПа для композиту з п'ятьма відсотками волокон до 0,129 ГПа для композиту з п'ятнадцятьма відсотками наповнювача, тобто втричі. Модуль також збільшується втричі при переході від 5 до 15 відсотків SiC у композиті, отже збільшення механічних характеристик відбувається пропорційно вмісту наповнювача.

Триботехнічні випробування зразків проводили на машині тертя М-22М при постійній швидкості ковзання 0,5 м/с і змінних навантаженнях. В якості контртіла використовували ролики із загартованої сталі 45. Знос чистого фторопласту при тиску 0,5 та 1,0 МПа складає 700 і 1300 мкм/км. При подальшому збільшенні тиску чистий фторопласт катастрофічно зношується. Результати випробувань чистого фторопласту 4Д та наповненого 5, 10, 15 % нановолокнами показали, що коефіцієнт тертя та зносостійкість нанокompозиту значно залежать від вмісту нановолокон карбїду кремнію. Введення п'яти відсотків нановолокон в фторопласт призводить до підвищення зносостійкості композиту в декілька раз. Із збільшенням об'ємного складу волокон до 15% при заданій швидкості ковзання і тиску 0,5 МПа при шляху тертя 3-5 км знос відсутній.

### ***ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ З'ЄДНАННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД МАТЕРІАЛУ ЗРАЗКА***

***Белевець К. С., студентка; Степанова А. А., студентка; Мусяєнко О. С., PhD,  
ст. викладач***

***Механіко-машинобудівний інститут, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна***

Лазерне зварювання є одним з найперспективніших та найрозповсюдженіших методів зварювання полімерних матеріалів. Цей метод пайки значно зменшився у вартості за рахунок розвитку технології та поширеного використання більш дешевих низькопотужних

лазерів. Лазерне зварювання найбільш поширене у масовому виготовленні харчової тари, упаковочних матеріалів та ізоляції, дозволяє легко отримувати міцний надійний шов.

Однією з переваг лазерної припайки є те, що в процесі не бере участь сторонній матеріал, склеєння елементів відбувається за рахунок розплавлення і дифузії матеріалу в місці спайки, саме тому від властивостей початкового матеріалу залежатимуть характеристики шва. Саме це і було досліджено в даній роботі: для проведення експерименту було взято фрагменти плівок з чотирьох різних полімерних матеріалів, надалі будемо називати матеріал «А», «Б», «В» і «Г» відповідно, кожний з яких було скріплено трьома швами і піддано випробуванню на розтяг до розриву. Дослідні зразки було підготовлено і навантажено згідно з інструкціями ГОСТ 14236-81 [1].

Кожна плівка була розрізана на десять смужок шириною 20 мм, які закріплювали в затискувачах випробувальної машини, зі швом посередині, відстань між якими - 50 мм, по мітках, що визначають положення, щоб поздовжні осі затискачів і вісь зразка збігалися між собою. Рівномірно затягують кінці, щоб усувалась можливість ковзання зразка в процесі випробування, але при цьому не відбувалося його руйнування в місці закріплення. Досліди здійснювалися зі швидкістю  $V=500\text{мм/хв}$  до моменту розриву.

Усі шви були виконані методом лазерної пайки за однакових умов, тож різниця в характеристиках міцності зумовлена властивостями самих полімерних плівок. Більшість фрагментів з матеріалу «А» під дією навантаження були розірвані у межах розрахункової довжини, при цьому шви лишилися неушкодженими, тобто для роз'єднання знадобилося б більше зусилля, ніж для порушення цілісності смужки без додаткових елементів. Зразки плівок «Б» були зруйновані внаслідок розриву швів, усі три ряди якого обірвались під дією навантаження. Ділянки смужок цього типу над та під місцем лазерного зварювання зазнали незначного розтягу, але не були зруйновані. Переважна кількість зразків «В» та «Г» порвалися у матеріалі, але при цьому руйнувався перший ряд шву, другий та третій лишилися неушкодженими.

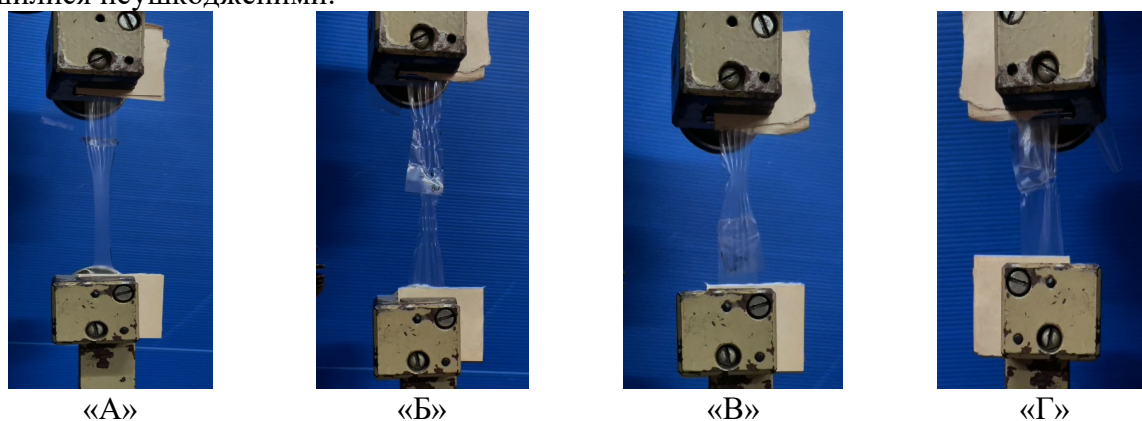


Рис. 1. Розрив зразків матеріалу «А», «Б», «В» та «Г»

Паралельно з проведенням випробування фіксувалася сила та переміщення, за результатом було отримано гістограму середніх навантажень по кожному зразку. Як результат, найбільші зусилля витримав матеріал «А».

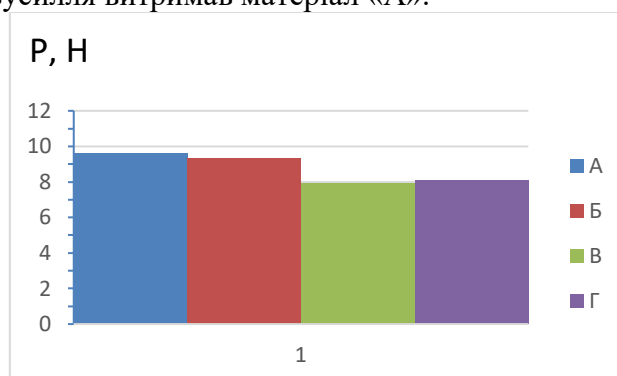


Рис. 2. Середні навантаження на зразках

В підсумку проведених досліджень було встановлено, що міцність зварних з'єднань полімерних матеріалів залежить від матеріалу. Ця залежність обумовлена різними значеннями міцності зразків та способами їх руйнування при однакових умовах зварювання.

#### **Список використаних джерел**

[1]. ГОСТ 14236-81 Плівки полімерні. Метод випробування на розтяг.

### ***ДИНАМІКА ЛОКАЛЬНИХ ДЕФЕКТІВ КРАУДІОННОГО ТИПУ ПІД ВПЛИВОМ ТЕРМАЛЬНИХ ФЛУКТУАЦІЙ ТА ПРОСТОРОВИХ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ***

***Бистрик Ю. С., к.ф.-м.н.***

*Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

Одним із різновидів дефектів у металах є так звані краудіони – локальні дефекти, що відповідають конфігурації ідеальної кристалічної решітки, для якої у щільно упакований ряд атомів вставляється додатковий атом. Такі дефекти, зокрема, можуть продукувати пластичні деформації в металах, а тому їх вивчення представляє значний інтерес в різноманітних задачах радіаційного матеріалознавства.

Простою та універсальною моделлю для дослідження дефектів краудіонного типу є модель Френкеля-Конторової. Ця модель описує динаміку ланцюжка атомів, що взаємодіють із найближчими сусідами у присутності певного зовнішнього потенціалу (який моделює взаємодію ланцюжка із кристалічною решіткою, вплив середовища і т.д.). У континуальній границі модель Френкеля-Конторової зводиться до відомого рівняння синус-Гордона, яке допускає існування солітонних розв'язків. Фундаментальна відмінність солітонних розв'язків від хвильових полягає в тому, що для них не виконується принцип суперпозиції і їх поведінка є подібною до частинок. Як наслідок, рівняння синус-Гордона відіграє важливу роль в різних розділах фізики, зокрема, як модель для опису руху дислокацій в кристалах, модель джозефсонівського контакту у теорії надпровідності чи нетривіальна модель теорії поля (наприклад, у дослідженнях скірміонів) тощо.

У даній роботі на основі моделі Френкеля-Конторової розглянуто динаміку краудіонів в кристалічній решітці із урахуванням термальних флуктуацій та просторових неоднорідностей у решітці. Використовуючи адиабатичне наближення для збуреного рівняння синус-Гордона, отримано стохастичне рівняння Ланжевена для положення центра мас краудіона. При малих інтенсивностях зовнішніх шумів показано, що динаміка краудіона описується лінеаризованим ефективним рівнянням Ланжевена, яке генерує випадкове блукання у випадковому середовищі. Із допомогою цього рівняння знайдено асимптотичний розподіл положення центра мас краудіона і показано, що його рух демонструє дифузю Синая.

### ***ЗАСТОСУВАННЯ РЕНТГЕНФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МІСЦЬ ПОХОДЖЕННЯ СИРОВИНИ КЕРАМІКИ***

***Бугай О. М.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н.; Білик В. М.<sup>1</sup>, м.н.с., Осадчий Є, М.<sup>1</sup>, к.і.н., н.с..***

*<sup>1</sup>Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

Керамічні вироби є наймасовішим археологічним матеріалом, який виявляється в ході археологічних досліджень. Важливим є дослідження різних видів керамічних матеріалів чи порівняння керамічних традицій різних культур. Традиційно вважається, що ліпні керамічні вироби є продуктом місцевого виробництва, натомість гончарні – були товаром або тарою

і потрапляли в культурно-історичне середовище певної археологічної культури в результаті торгівлі чи обміну. Але часто на поселеннях трапляються фрагменти ліпного посуду, виготовлені та орнаментовані в іншій традиції, притаманній для сусідньої культурно-хронологічної спільноти.

Метою дослідження була перевірка можливості ідентифікації місця походження сировини для гончарних виробів із застосуванням РФА аналізу. Для дослідження було взято чотири фрагменти ліпного посуду раннього залізного віку з поселення на східному березі озера Чеха у м. Суми. Для порівняння також було взято зразки місцевої глини, які були відібрані на тому ж поселенні та в найближчій окрузі, яка на час його існування була його ресурсною зоною (Рис.1). Забір глини на аналіз здійснювався вздовж високого південного берега озера на різній глибині (від 1 до 2,5 м). Використання елементного аналізу для ідентифікації керамічних зразків широко використовується в зарубіжній археології [1].

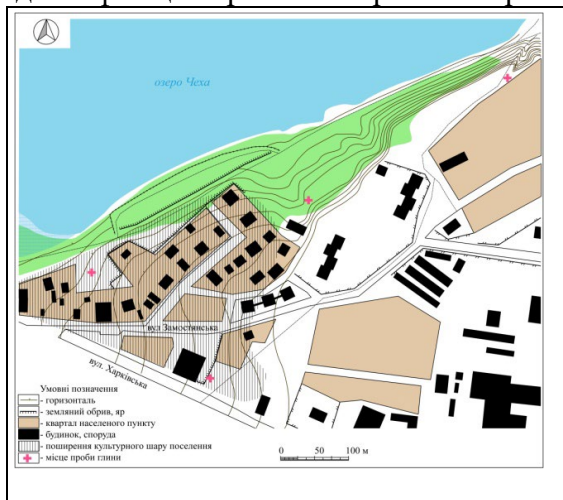


Рис. 1. План поселення та міст відбору глини.

Для дослідження елементного складу глини та кераміки був використаний портативний рентгенівський аналізатор ProSpector3 («Елватех», Україна). Для розробки найбільш точної методики характеристики зразків, проводились дослідження як невідпаленої глини, так і відпаленої глини. Перед відпаленням глина пресувалася з використанням мініатюрний пресу гвинтового типу. Відпалювання відбувалось в муфельній печі за температури 800<sup>0</sup>С. Процес тривав 1 годину з подальшим повільним охолодженням разом із муфельною пічкою.

Для порівняльного аналізу була побудована залежність сумарної молярна концентрації плавнів до співвідношення молярних концентрацій оксиду алюмінію та оксиду кремнію (Рис.2). Результати аналізу показали, що всі відібрані зразки глини є близькими за фізико-хімічними характеристиками.

Подібними один до одного (але з більшим розмахом відмінностей) є зразки кераміки. Але пряме порівняння елементного складу глини в родовищі та елементного складу кераміки не може дати однозначної відповіді щодо ідентифікації місця походження кераміки.

Також були проведені дослідження впливу механічного стану керамічного зразка, на визначення його елементного складу. А саме керамічний зразок був розмелений в дрібний порошок з подальшим його пресуванням. Таким чином було отримано зразки аналогічні по своїй структурі до зразків пресованої глини. Результати також представлені на рис. 2.

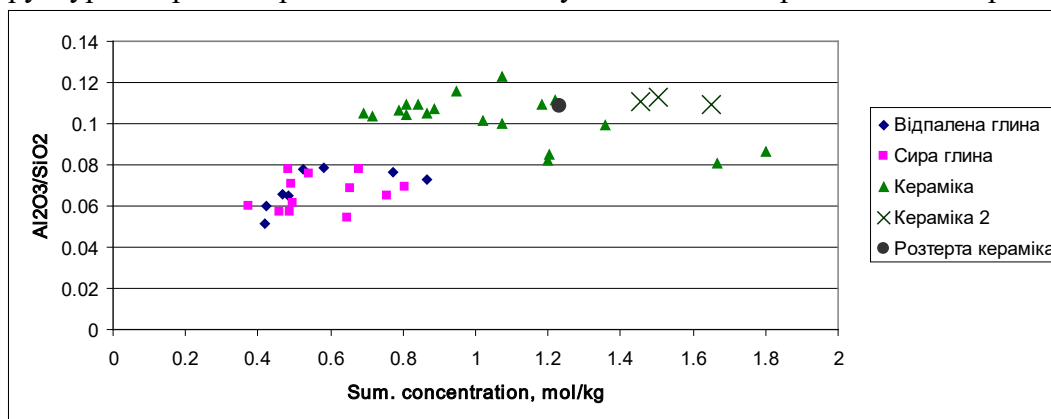


Рис. 2. Розподіл зразків за залежністю вмісту плавнів до відношення концентрацій оксиду алюмінію та оксиду кремнію.

В результаті наших досліджень можна навести наступні чинники які ускладнюють ідентифікацію:

- методика підготовки зразків глини (Відпалювання та пресування недостатньо. Необхідне виготовлення повноцінної кераміки для аналізу);

- технологія виробництва кераміки, а саме додавання до основної глини різних пісних домішок із перетертих уламків старої кераміки;

- подальша експлуатація керамічного виробу;

- природні умови місця в якому перебувала кераміка.

Однак разом з додатковими дослідженнями (петрографією, ізотопним аналізом і т.д.), на думку авторів, ідентифікація місця походження сировини для гончарних виробів можлива.

З огляду на отримані результати можна зробити висновок що глина відібрана на території поселення біля озера Чеха не відповідає дослідженим керамічним знахідкам на тій же території. Даний факт підтверджується як неспівпадінням розподілу зразків на діаграмі, так і наявністю у зразках кераміки значно більшого вмісту оксиду заліза в порівнянні із зразками глини.

#### Список використаних джерел

[1] Dean E. Arnold, Hector Neff and Ronald L. Bishop. American Anthropologist, Vol. 93, No. 1 (Mar., 1991), pp. 70-90.

### ***ВПЛИВ РАДІАЦІЙНО-ІНДУКОВАНОГО НАСИЧЕННЯ ВАКАНСІЯМИ НА ФАЗОВЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ПЕРШОГО РОДУ В НАНОЧАСТИНКАХ МЕТАЛІВ ТА КЕРАМІКИ: ПРИКЛАДНА ТЕОРІЯ І МОДЕЛЮВАННЯ***

***Білогородський Ю. С.<sup>1</sup>, м.н.с.; Шірінян А. С.<sup>1</sup>, д.ф.-м.н, доц., зав.лаб.,***

***<sup>1</sup> Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна***

Коли кристалічні матеріали піддаються опроміненню, такому як іонне бомбардування або від джерел випромінювання високої енергії, у кристалічній решітці утворюються вакансії через зміщення атомів. Ці вакансії можуть істотно впливати на структурні, механічні та електронні властивості матеріалів. Виникає питання: як викликані радіацією вакансії впливають на фазові перетворення першого роду в нанорозмірних системах?

Ми використовуємо сферичні наночастинки, що демонструють переходи з  $\alpha$ -фази в  $\beta$ -фазу та з  $\beta$ -фази в  $\alpha$ -фазу як модельну систему і дослідили два випадки: 1) модель залізоподібного наноматеріалу з поліморфними фазовими переходами, 2) модель керамічного наноматеріалу SiC з можливістю аморфізації керамічної сполуки. Використовуючи стаціонарний підхід (квазістаціонарний розв'язок рівнянь утворення і анігіляції дефектів) у теорії хімічної швидкості і відповідний термодинамічний опис, ми демонструємо можливість радіаційно-індукованих фазових переходів, а також зони радіаційної стабільності для  $\alpha$ -фази та  $\beta$ -фази наночастинки.

Наше модельне дослідження показує, що дуже малі частинки  $\alpha$ -фази є нестабільними (у той час як дуже малі частинки  $\beta$ -фази стабільні), і перетворення  $\alpha$ -фази в  $\beta$ -фазу може відбуватися незалежно від опромінення. Однак у деяких випадках нуклеація вимагає великої додаткової зміни енергії, що призводить до низької ймовірності коливань зміни фази  $\alpha$  на  $\beta$ . Існує проміжна зона розмірів і параметрів, де частинка  $\alpha$ -фази нестабільна без опромінення, але стає стабільною під опроміненням. Для великих розмірів і низьких температур перетворення  $\alpha$  в  $\beta$  не може відбутися незалежно від опромінення; частинка  $\alpha$ -фази стабільна, тоді як частинка  $\beta$ -фази нестабільна.

Ми систематизуємо дані й аргументуємо висновки на основі варіації параметрів моделювання про речовини. Порівнюючи енергію міграції вакансій між металами та

керамікою, ми спостерігаємо, що кристалічні керамічні речовини зазвичай демонструють значно вищі значення. Це свідчить про те, що вплив радіації на фазові зміни в кераміці має бути більш вираженим. І навпаки, в металах вплив випромінювання на фазову стабільність буде менш помітним, особливо в кристалічних станах.

Результати моделювання свідчать, що для металевих наночастинок розміром до 200-300 нм лише точкові дефекти (радіаційні вакансії) не можуть пояснити фазові переходи. Для звичайних доз радіації опромінення реактора може не викликати значних фазових змін у більшості металів. Посилити ефект можна лише шляхом значного збільшення дози опромінення. Таким чином, більшість нанорозмірних металів (з низькою енергією міграції вакансій) мають виявляти кращу стійкість до опромінення і можуть бути рекомендовані для ядерних матеріалів.

Показано, що речовини з високою енергією міграції вакансій, малим коефіцієнтом дифузії вакансій, низькою температурою фазового переходу першого роду можуть слугувати відповідними кандидатами для радіаційно-індукованого фазового переходу в наносистемах. Потенційними кандидатами в цьому сенсі є керамічні матеріали.

#### Список використаних джерел

[1] A.S. Shirinyan, Y.S. Bilogorodskyy, O.M. Krit, «Phase stability of spherical fe nanoparticles under radiation saturation with vacancies» Ядерна фізика та енергетика, Vol. 5. P. 125–129, 2022.

### **СКЛО З ПАМ'ЯТОК КУЛЬТУРИ ЧЕРНЯХІВ-СИНТАНА-ДЕ-МУРЕШ ІЗ ЗІБРАННЯ СУМСЬКОГО ОБЛАСНОГО КРАЄЗНАВЧОГО МУЗЕЮ: ХАРАКТЕРИЗАЦІЯ МЕТОДОМ РЕНТГЕНФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛІЗУ**

**Бугай О. М.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н.; Білинська Л. І.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

<sup>2</sup> Сумський обласний краєзнавчий музей, Суми, Україна

У фондах Сумського обласного краєзнавчого музею зберігаються п'ять зразків скла з могильників культури Черняхів-Синтана-де-Муреш. Два зразки А1213, А1199(могильник с.Сад, Сумського району, Сумської області) являють собою циліндричні круглодонні кубки з прозорого, світло-оливкового скла. Інші зразки є фрагментами скла: прозорого білого 3490 (могильник с. Успенка, Конотопського району, Сумської області), зеленого (два зразки Тр.5, Тр.6) (могильник с. Боромля, Охтирського району, Сумської області).

Зразки були проаналізовані методом портативної рентгенфлуоресцентної спектроскопії із застосування спектрометра Elvatech (Україна). Концентрації розраховувались методом фундаментальних параметрів. Достовірність аналізу перевірялась з використанням зразків відомого складу.

Результати аналізу (таблиця 1) показали, що всі проаналізовані скла являють собою натрієво-вапняно-кремнеземне скло, за винятком зразка Тр.5 (Боромля), в якому кількість натрію нижче межі визначення. В той же час цей зразок не є склом, багатим на калій. У всіх зразках для отримання прозорості застосовували. Марганець і залізо можуть надавати оливковий та зелений колір зразкам. Зразки фрагментів скла мають підвищену концентрацію глинозему. Оскільки ці зразки мають сліди оплавлення та, крім глинозему, підвищену концентрацію оксиду кальцію, можна припустити, що це спричинено забрудненням попелом.

Склад скла кубків вказує, що це скло може бути віднесено до Левантійської групи за класифікацією Фрістоуна (Freestone) [1]

Таблиця 1  
Концентрація оксидів у склі (в %)

Назва	Кубок А1213	Кубок А1199	Скло Тр.5	Скло Тр.6	Скло 3490
Пам'ятка	Сад	Сад	Боромля	Боромля	Успенка
Na <sub>2</sub> O	7.89	9.63	0	8.15	6.09
MgO	0	0.79	0.6	0	0.75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.79	2.64	9.21	4.05	9.21
SiO <sub>2</sub>	77.5	74.29	68	75.15	75.32
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0.01	0.19	0.01	0.01
SO <sub>2</sub>	0.27	0.18	0.12	0.17	0.18
K <sub>2</sub> O	1.25	1.56	3.7	2.57	1.37
CaO	7.7	9.07	15.16	7.53	6.55
TiO <sub>2</sub>	0.17	0.13	0.45	0.24	0.07
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.04	0	0.02	0.01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0	0	0
MnO	1.45	0.78	0.66	0.95	0.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.85	0.884	1.85	1.16	0.4
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0.01	80	0	0	0
NiO	0.03	80	0.03	0	0.01
CuO	0.04	0.06	0.04	0	0.02

#### Список використаних джерел

- [1] Freestone I. C., Ponting M., Hughes M. J. Origins of byzantine glass from Maroni Petrera, Cyprus. *Archaeometry*, 44. p. 257–272, 2002.

### МОДИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ ТАО-ЕЛДРУПА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКІСТІ АНІГЛЯЦІЇ ПОЗИТРОНА В ПОТЕНЦІАЛЬНІЙ ЯМІ

*Ворона М. І, м.н.с.; Лебедь О. А., д.ф.-м.н., с.д.  
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

Одним із наслідків інтенсивного радіаційного опромінення іонами або нейтронами, яке характерне для конструкційних матеріалів ядерних реакторів, є виникнення вакансійних або газонаповнених пор. Опромінення впливає на фізичні властивості матеріалів, зокрема воно призводить зменшення їхньої пластичності. Особливого значення ці явища набувають для конструктивних матеріалів ядерних реакторів, що перебувають під інтенсивним постійним нейтронним опроміненням. Радіаційні ушкодження ініціюються на атомному рівні, тому для встановлення загальних закономірностей зміни структури та фізико-механічних властивостей, прогнозування працездатності матеріалів конструкцій активних зон необхідно, насамперед, вивчення процесів зародження та еволюції дефектної структури матеріалів.

Метод позитронної анігляційної спектроскопії (ПАС) є потужним інструментом для дослідження електронної структури матеріалів та визначення дефектів у них. Особливість цього методу полягає в тому, що зміни в електронній структурі матеріалу впливають на час життя позитрона всередині нього. Позитрон, при потраплянні в матеріал, взаємодіє з електронами та втрачає свою енергію, що реєструється у вигляді змін у спектрах анігляції. Анігляція позитронів у різних матеріалах стала предметом дослідження наукової спільноти

протягом тривалого часу через її важливість у вивченні властивостей матеріалів та виявленні дефектів. Цей метод дозволяє виявляти концентрації точкових і протяжних дефектів у матеріалі, що є важливим для розвитку нових матеріалів та поліпшення їх властивостей. Дослідження за допомогою методу ПАС відкривають нові можливості для розуміння структури та властивостей різних матеріалів [1-2]. Позитроній - це зв'язана система, яка утворюється під час захоплення позитроном електрона в речовині, утворюючи позитроній. Позитроній може існувати у двох станах - парапозитроній (p-Ps) зі спіном 0 та ортопозитроній (o-Ps) зі спіном 1. Під час анігіляції, позитроній анігілює випромінюючи фотони. Для ортопозитронію (o-Ps), який має спін 1, можливий механізм анігіляції, коли позитрон взаємодіє з електронами з протилежним спіном у середовищі. Цей процес може призвести до анігіляції позитронію та випромінювання двох гамма-квантів. Цей механізм, відомий як анігіляція вилучення (pick-off), може відігравати важливу роль у зміні часу життя ортопозитронію в зовнішньому середовищі. Дослідження цього типу анігіляції вилучення, як і інших аспектів поведінки позитронів та позитроніїв, має велике значення для розуміння властивостей матеріалів та їх електронної структури [1-4]. Цей підхід дозволяє дослідникам краще розуміти властивості матеріалів, їхню структуру та взаємодію позитронів з електронами. Аналіз механізмів анігіляції вилучення відкриває можливості для вивчення електронної структури матеріалів на молекулярному рівні та виявлення дефектів у них. Такі дослідження є ключовими для розвитку нових матеріалів та вдосконалення їх властивостей.

Дослідження Тао [1], яке включало систематичний аналіз поведінки стану ортопозитронію (o-Ps) під час процесу анігіляції в сферичних потенціальних ямах в молекулярних рідинах, є дуже важливим для розуміння властивостей позитронів у складних середовищах. Тао узагальнив цю проблему для незбуреного та безструктурного середовища, що дозволяє краще розуміти взаємодію позитронів з матеріалами і рідинами на молекулярному рівні. Експериментальне підтвердження моделі Тао було забезпечене пізніше Елдрупом та іншими дослідниками, які також вивчали температурні ефекти в спектрах часу життя позитронів в матеріалах [2]. Їхні роботи стали класичними і відіграють важливу роль у розвитку моделей для вивчення часу життя позитронів та анігіляції вилучення в різних середовищах. Модель Тао-Елдрупа враховує електронну густину в приграничному шарі та в основному об'ємі матеріалу, що дозволяє враховувати вплив структурних особливостей матеріалу на анігіляцію позитронів. Це припущення дозволяє покращити точність та адекватність моделі для вивчення поведінки позитронів у складних середовищах.

З одного боку модель Тао-Елдрупа забезпечує простий та наглядний зв'язок між розміром сферично симетричних потенціальних ям та часом життя в них ортопозитронієвих станів по механізму анігіляції вилучення електрона. Проте, з іншого боку, припущення та наближення в основі моделі не завжди можна використовувати для отримання коректних результатів.

В попередніх дослідженнях авторами [4] модель Тао-Елдрупа було узагальнено на випадок потенціальної ями скінченної висоти, яка дозволяє аналітично розрахувати час життя позитрона в сферично симетричній потенціальній ямі з урахуванням тунелювання позитронів за межі ями. Визначено залежності часу життя позитронів від висоти та ширини потенціальної ями, яка виникає в місці точкових дефектів.

В представленому дослідженні розглядаються можливості подальших модифікацій моделі Тао-Елдрупа, зокрема для випадків:

- 1) Врахування нерівномірного розподілу електронів всередині потенціальної ями;
- 2) Можливості аналітичного розрахунку швидкості анігіляції позитрона в ямах несферичної форми;
- 3) Обчислення сигналів в спектрах часу життя позитронів за наявності статистичного розподілу по висотам та розмірам потенціальних ям, тобто розподілу по розмірах точкових дефектів в матеріалі.

### Список використаних джерел

- [1] S.J. Tao, « Positronium annihilation in molecular substances» J. Chem, Phys., V. 56, p. 5499, 1972.
- [2] M. Eldrup, D. Lightbody, J. N. Sherwood, «The temperature dependence of positron lifetimes in solid pivalic acid» J. Chem., Phys., V. 63, p. 51, 1981.
- [3] M.J. Puska, R.M. Nieminen, «Theory of positrons in solids and on solid surfaces» Rev. Mod. Phys. V. 66, p. 841, 1994.
- [4] М. І. Ворона, О. А. Лебедь, « Швидкість анігіляції позитронів у точкових дефектах реакторних матеріалів у модифікованій моделі Тао - Елдрупа», Ядерна фізика та енергетика, т. 24, ст. 113-121, 2023

## **РЕЗОНАНСНЕ УТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЇ ПАРИ ПРИ РОЗСІЮВАННІ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ ФОТОНІВ НА ЦИРКУЛЯРНО-ПОЛЯЗОВАНОМУ ЛАЗЕРНОМУ ПОЛІ**

**Ворошило О. І., к.ф.-м.н., с.н.с.; Недорешта В. М., к.ф.-м.н.**  
*Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

Процес утворення електрон-позитронної пари при розсіюванні лазерного пучка на електронному (тризуб-процес) експериментально спостерігався в експерименті SLAC E-144 [1]. Нові дослідження цього процесу можуть бути проведені в очікуваних експериментах LUXE в DESY [2] та E320 в SLAC [3]. Основна трудність теоретичного опису процесів 2-го порядку за сталою тонкої структури в складності і громіздкості виразів для ймовірності. Тому для опису таких процесів використовується різні наближення. Так в нашій роботі використовується резонансне наближення для дослідження процесу утворення електрон-позитронної пари при розсіюванні високоенергетичних фотонів на лазерному пучку (фото-тризуб). Цей процес доповнює результати експерименту з тризуб-процесу, т.я. високоенергетичні фотони будуть виникати, як результат найбільш ймовірного процесу випромінення фотона електроном при розсіюванні на лазерній хвилі. Ці фотони в результаті процесу фото-тризубу можуть утворювати електрон-позитронної пари, що вносить певний вклад в експеримент із дослідження тризуб-процесу. Визначення цього вкладу і є задачею нашого дослідження. Відмітимо, що досліджуваний процес описується двома діаграми: першій діаграмі відповідає випадок коли в першій половині процесу утворюється позитрон, другій – кінцевий електрон.

Резонансне наближення, що буде використане до розв'язку задачі, полягає в припущенні, що основний вклад в процес вносять проміжні стани, близькі до масової поверхні. Розбіжності, що виникають в ймовірності, усуваються добавкою до маси проміжної частинки уявної добавки – ширини проміжного стану, що визначається повною ймовірністю розпаду проміжного стану за рахунок однофотонного випромінювання. Варто звернути уваги, що в цьому наближенні можна знехтувати інтерференцією амплітуд, т.я. резонанс відбувається в різних кінематичних областях. Для використання резонансного наближення амплітуда процесу записується у вигляді подвійної суми парціальних амплітуд, які відповідають кількості фотонів лазерного поля, що прийняли участь в процесі в 1-ій та 2-ій вершинах. Основна трудність, що виникає при знаходженні виразу для парціальної ймовірності (квадрату парціальної амплітуди) пов'язана з розрахунком шпуру (сліду) від добутку 8 і більше матриць Дірака, як результат отриманий результат настільки громіздким, що є непридатним для подальшого аналізу. Нами запропонований метод, що дозволяє звести розрахунок ймовірності до знаходження ймовірностей процесів 1-го порядку, зокрема, для 1-ої діаграми, це поглинання початкового фотону з утворенням електрон-позитронної пари та процесу розсіювання проміжного електрона в полі лазерної хвилі з випромінюванням кінцевого фотону, причому розрахунки необхідно проводити для поляризованого проміжного стану.

В результаті проведеного дослідження отримана ймовірність процесу утворення електрон-позитронної пари при розсіюванні високоенергетичного поляризованого фотона на полі плоскої циркулярно поляризованої електромагнітної хвилі в резонансному наближенні.

#### Список використаних джерел

- [1] D. L. Burke et al., Positron Production in Multiphoton Light-by-Light Scattering, *Phys. Rev. Lett.* 79, 1626 (1997).  
 [2] H. Abramowicz et al., Conceptual design report for the LUXE experiment, *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 230, 2445–2560 (2021).  
 [3] F. C. Salgado et al., Single particle detection system for strong-field QED experiments, *New J. Phys.* 24, 015002 (2022).  
 [4] L. P. Pitaevskii V. B. Berestetskii, E. M. Lifshitz. *Relativistic Quantum Theory*. Pergamon, Oxford, 1971.

### **ШЛЯХИ ФОРМУВАННЯ НАУКОВОГО СВІТОГЛЯДУ УЧНІВ ПРИ ВИВЧЕННІ ФІЗИКИ**

*Гаркавий М.С., магістрант; Салтиков Д.І., доктор філософії (природничі науки)  
 Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Суми, Україна*

У сучасних умовах перед кожною людиною стає досить складне завдання вибору власного життєвого шляху, при цьому відбувається становлення її особистісних поглядів, світорозуміння, світовідчуття. Оскільки перелічені вище якості особистості є компонентами її світогляду, то слід особливо увагу приділяти формуванню світогляду молоді.

Становлення світогляду людини починається з моменту його народження, усвідомлення нею себе та свого місця у світі та триває протягом життя. Під час навчання у школі відбувається формування наукового світогляду. Фізика – це один з предметів, який має першорядне значення для його формування, адже фізика як наука є важливим і потужним джерелом знань про навколишній світ. Крім цього, вона є основою науково-технічного прогресу і робить значний внесок у розвиток духовної культури людства, формує його світогляд і навчає орієнтуватися в шкалі культурних цінностей. У всі часи авторитет науки був потужним фундаментом для формування світогляду людей. Фізика є найбільш розвиненою і систематизованою з природничих наук. Сучасна наукова картина світу значною мірою базується на її досягненнях, а розвиток самої фізики безпосередньо пов'язаний з побудовою фізичної картини світу, що весь час змінюється [1].

Можна виділити такі шляхи формування наукового світогляду учнів у процесі навчання фізики:

1. Навчання фізики як відображення сучасної фізичної картини світу.
2. Встановлення внутрішньопредметних і міжпредметних зв'язків між явищами, що вивчаються, і правильне їх пояснення.
3. Використання під час уроків фізики методологічних знань. Методологічні знання – узагальнені знання про методи та структуру фізичної науки, основні закономірності її функціонування та розвитку, які внутрішньо притаманні сучасному курсу фізики. Методологічні знання включають:
  - ✓ науковий експеримент та методи експериментального пізнання;
  - ✓ фізичні теорії та методи теоретичного пізнання;
  - ✓ основоположні методологічні ідеї фізики;
  - ✓ основні закономірності розвитку фізики;
  - ✓ концепція еволюції фізичної картини світу.

4. Розвиток наукового стилю мислення учнів
5. Формування поглядів на розвиток науки.
6. Генералізація, систематизація та узагальнення знань учнів.

Формування світогляду при вивченні фізики дає можливість учню у майбутньому краще розуміти процеси, які відбуваються у природі та адекватно реагувати і критично оцінювати інформацію щодо різних проблем, особливо, екологічних. І саме від учителя, у більшій мірі, залежить чи матимуть учні не тільки знання, а й цілісне уявлення про навколишній світ.

#### **Список використаних джерел**

[1] Салтикова А.І., Завражна О.М. «Сучасна фізика як засіб формування світогляду учнів». Теоретико-методичні засади вивчення сучасної фізики та нанотехнологій у загальноосвітніх та вищих навчальних закладах: матеріали I Міжрегіональної науково-методичної конференції, м. Суми, 26-27 листопада 2015 р. / за ред. О.М. Завражної – Суми: СумДПУ, с.54-55, 2015.

### **ВИКОРИСТАННЯ ВІРТУАЛЬНИХ ЛАБОРАТОРІЙ З ФІЗИКИ: ПЕРЕВАГИ ТА МОЖЛИВОСТІ**

**Чкана Я.О., к.п.н., доц.; Глазько С. С., магістр**

*Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Суми, Україна*

Сучасне навчання фізики у школі набуває новітніх форм та методик завдяки зростанню доступу до онлайн ресурсів та технологій. Одним із таких ресурсів є віртуальні лабораторії, які надають можливості експериментувати та вивчати фізичні явища у віртуальному середовищі. Вони дозволяють учням самостійно проводити експерименти і спостерігати їх результати без необхідності доступу до фізичного обладнання, вносити зміни в параметри експерименту і спостерігати вплив цих змін на отримані результати, моделювати складніші сценарії проведення експерименту.

Використання віртуальних лабораторій у навчальному процесі має ряд переваг:

- 1) знімання показників у віртуальній лабораторії, особливо з можливістю збільшення масштабів, є легшим, ніж у справжніх умовах;
- 2) простота проведення експерименту, учні можуть експериментувати без будь-яких витрат і будь-коли, легко проводити експеримент багато разів, щоб швидко перевірити чи оцінити якусь ідею;
- 3) реальність може бути адаптована для навчальних потреб, що дає можливість учням краще зрозуміти складні концепції;
- 4) наявність похибок у вимірюваннях, що сприяє розвитку у студентів компетенцій у виявленні та управлінні похибками [3];
- 5) дослідження показують, що учні однаково оцінюють віртуальні лабораторії та реальні за їхню реалістичність [1, 2].

Такі ресурси як Go-Lab, Фізика в школі - HTML5 [4] та phet.colorado.edu [5] є важливими інструментами у вивченні фізики та містять велику кількість віртуальних лабораторій. Наприклад, Go-Lab забезпечує доступ до віддалених та віртуальних лабораторій, а також надає структуру та скафолди для підтримки навчального процесу. Фізика в школі - HTML5 та phet.colorado.edu надають інтерактивні симуляції та віртуальні експерименти з фізики.

При вивченні геометричної оптики, наприклад, закону відбиття світла, учні можуть виконувати віртуальні експерименти з різними кутами падіння та вивчати, як це впливає на кут відбиття. Моделювання реальних ситуацій, наприклад, відбиття світла в дзеркалі,

допоможе краще зрозуміти як працює відбиття світла на практиці та візуалізувати різні аспекти цього явища.

Враховуючи останні тези, особливу увагу наразі заслуговує розглянута нами платформа університету Колорадо [phet.colorado.edu](http://phet.colorado.edu) [5], оскільки вона є безкоштовною, вільною та легкою у доступі, містить велику кількість якісних та зручних у використанні інтерактивних симуляцій українською мовою, працює без додаткового встановлення на будь-який пристрій та стає доступною під час переходу за посиланням, поданим вчителем.

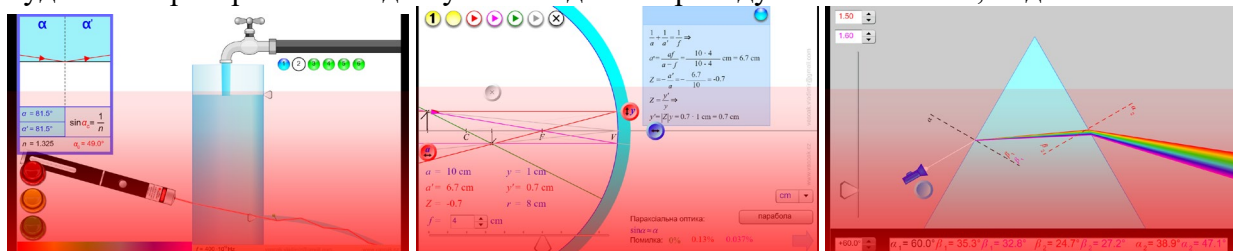


Рис. 1. Віртуальні лабораторії платформи [phet.colorado.edu](http://phet.colorado.edu)

Використання віртуальних лабораторій з фізики є важливим елементом сучасної освіти. До переваг їх використання можна віднести зручність, доступність та можливість експериментування без обмежень. Крім цього, використання віртуальних інтерактивних засобів стимулює учнів до активного дослідження та аналізу отриманих даних. Учні можуть самі висувати гіпотези, тестувати їх за допомогою експериментів і робити висновки на основі отриманих результатів, що сприяє розвитку їх критичного мислення.

#### Список використаних джерел

[1] Corter, J. E., Esche, S. K., Chassapis, C., Ma, J., & Nickerson, J. V. (2007). Analyzing tutoring systems: Interaction logs and automated indicators of tutor effectiveness. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 17(1-2), 121-144.

[2] Corter, J. E., Esche, S. K., Tversky, B., Ma, J., & Nickerson, J. V. (2011). Learning by design: Good video games as learning machines. *Journal of the Learning Sciences*, 20(1), 45-61.

[3] Toth, E. E., Suthers, D. D., & Lesgold, A. M. (2009). Macro-level knowledge convergence: A comparison of multiple methods of network analysis. *Journal of the Learning Sciences*, 18(1), 111-151.

[4] Сайт інтерактивних симуляцій PhET. Режим доступу: <https://phet.colorado.edu/uk/>

[5] Сайт інтерактивних симуляцій vascak. Фізика в школі - HTML5. Режим доступу: <https://www.vascak.cz/physicsanimations.php?l=ua>

### ДИДАКТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ФІЗИКИ У РОЗВИТКУ КРИТИЧНОГО МИСЛЕННЯ

**Голубков В.М., магістрант<sup>1</sup>, викладач<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Суми, Україна,

<sup>2</sup> КЗ СОП «Путівльський педагогічний фаховий коледж імені С.В. Руднева»

Фізика відіграє важливу роль у сучасній школі, формуючи в учнів науковий світогляд, який ґрунтується на розумінні природи та її законів, що, в свою чергу базується на доказах, логіці та аналізі. Все це можливо лише за умови якісного розвитку критичного мислення.

Державний стандарт базової середньої освіти [1] зосереджує увагу на формуванні вміння критично і системно мислити, визначати характерні ознаки явищ, подій та ідей, аналізувати та встановлювати взаємозв'язки. Також важливим є формування вміння оцінювати доказовість і вагомість аргументів у судженнях, розрізняти факти, їх

інтерпретації, розпізнавати спроби маніпулювання даними, оцінювати якість доказів і достовірність інформації.

Навчальні програми з фізики [2, 3], в свою чергу, конкретизують ці вимоги, як формування не тільки уміння використовувати понятійний апарат для пояснення перебігу природних явищ, процесів, усвідомлення умов та границь застосування фізичних моделей, законів і теорій, але й здатності критично мислити та застосовувати набуті знання на практиці.

Формування та розвиток критичного мислення відбувається під час опрацювання інформації, розв'язання задач та проблемних ситуацій, вибору раціональних способів діяльності [4]. Все це готує випускників до здатності виконувати самостійний пошук з використанням різних джерел, аналізувати та узагальнювати результати пошукової діяльності, вміння застосовувати свої знання на практиці.

Сучасна педагогічна наука розрізняє репродуктивні методи (пояснювально-ілюстративний, репродуктивний), продуктивні методи (евристичний і дослідницький), метод проблемного навчання, рис.1.

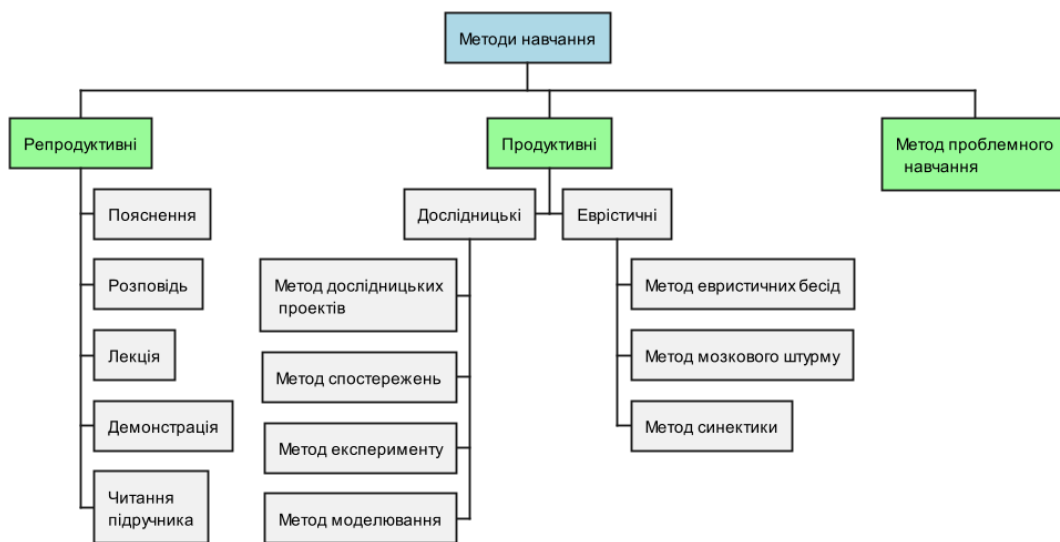


Рис. 1. Класифікація методів навчання

Розвиток критичного мислення найчастіше відбувається шляхом використання продуктивних і проблемних методів. До того ж необхідно включати їх елементи при вивченні кожної теми. Також важливо використовувати їх не тільки для вивчення конкретного матеріалу з того, чи іншого розділу фізики, а й опановувати нові якості мислення в цілому.

Серед проблемних завдань можна розглядати:

- завдання з помилками;
- завдання з недостатніми або зайвими даними;
- завдання експериментального характеру;
- використання історичного матеріалу та досвіду учнів.

Виконання лабораторних робіт дозволяє отримати експериментальні дані та перевірити їх відповідність теоретичним положенням. Крім того дає можливість будувати моделі фізичних процесів, планувати досліді.

Таким чином, ми можемо визначити дидактичні можливості курсу фізики для формування критичного мислення:

1. розвиває науковий світогляд та цілісне уявлення про природу і про навколишній світ;
2. використовує аналітичний підхід та критичний погляд на проблемні ситуації, аналіз одержаних відповідей вирішених завдань на істинність і відповідність дійсності;
3. використовує різні форми занять, на яких розвивається критичне мислення учнів;
4. використовує ситуації з повсякденного життя;

5. вивчає певні технології, створює базові знання для їх осмислення та визначення впливу на різні сторони життєдіяльності.

Викладання фізики є благодатною основою для формування розвиненої особистості, здатної до творчого мислення, вміння адаптуватися до світу, що швидко змінюється, здатної критично оцінювати інформацію, та отримувати нові знання.

Цей процес циклічний і неперервний, який не обмежується лише загальноосвітньою школою чи університетом, а відбувається протягом усього життя.

#### Список використаних джерел

[1] Державний стандарт базової середньої освіти: електронне джерело, URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-deyaki-pitannya-derzhavnih-standartiv-povnoyi-zagalnoyi-serednoyi-osviti-i300920-898>

[2] Програма для загальноосвітніх навчальних закладів 10-11 класи. Фізика. Рівень стандарту. Академічний рівень. Профільний рівень.—Київ: Поліграфкнига, 2015.—35с.

[3] Програма для загальноосвітніх навчальних закладів 7-9 класи. Фізика. Рівень стандарту. Академічний рівень. Профільний рівень.—Київ: Поліграфкнига, 2015.—35с.

[4] Нечепельська Н.В. Формування критичного мислення/ Н.В. Нечепельська// Педагогічна майстерня. - 2010 .- №5.- с. 2-5.

### **ЗАЛЕЖНІСТЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТІВ КАРБОН-СМОЛА ВІД СКЛАДУ СМОЛИ ТА ЦИКЛУ ЇЇ ЗАСТИГАННЯ — ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД**

*Гусак А.В., студентка; Мусієнко О.С., PhD, ст. викладач  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна*

Новітні композитні матеріали набувають усе більше й більше популярності як у наукових колах, так і на виробництвах [1]. Властивості отриманого композиту можуть залежати від багатьох параметрів, таких як метод виготовлення, склад полімеру, термічний цикл його застигання, домішки, кількість шарів, форма волокон армування, тощо. Розглянемо вплив складу та процесу застигання полімерної матриці на властивості отриманого композиту на прикладі композиту з карбону та епоксидної смоли, як одного з найбільш поширених композитів.

По-перше, одним з основних стандартів затверджено визначення епоксидної смоли [2]: епоксидна смола — це синтетична смола, яка містить епоксидні групи, зазвичай отримана з епіхлоргідрину та бісфенолу. Також затверджені допустима кількість наявних у смолі домішок, фізико-хімічні властивості та ін. для неотвердженого стану [3], а також стандартний цикл для визначення тенденції до кристалізації епоксидної смоли [4]. При формуванні композитів виробів епоксидна смола знаходиться в рідкому стані, а в кінцевій деталі вона отверджена. Затвердження епоксидної смоли відбувається за допомогою хімічних реакцій з речовиною-затверджувачем, з можливим застосуванням підвищеної температури та/чи пресу [5].

При чому властивості отриманого композиту можуть сильно залежати від обраного затверджувача при дотриманні однакових інших умов. Наприклад, дослідниками були випробувані зразки композиту карбон-смола, отримані за допомогою трьох різних затверджувачів: триетилентетрамін, ізофорондіамін та 4,4'-діамінодифенілсульфон, і при випробуванні на міцність при стиску при підвищенні температури була зафіксована різниця в 47% між різними зразками [6]. Також, необхідно зважати на відносну кількість затверджувача, оскільки вона може впливати на такі характеристики, як густина, твердість, міцність при згині та розтягу та ін. [7].

Окрім вибору затверджувача треба також зважати на обраний термічний цикл. Контролюючи його можна досягти поліпшення властивостей кінцевого виробу, таких як твердість, міцність при розтягу, стиску, згині та ін., в окремих випадках — до 70% [8]. Композити також можна піддавати додатковим циклами термічної обробки після затвердіння полімеру. Зі збільшенням кількості таких циклів можна значно збільшити твердість поверхні. Також було проаналізовано, як цей метод впливає на міцність композиту при стисканні, і виявлено, що розпад епоксидної смоли негативно впливає на цей параметр, однак це також залежить від форми карбонового армування. У висновку дослідники не рекомендують проводити більше чотирьох-п'яти додаткових циклів термічної обробки [9].

Окрім цього, незважаючи на те, що кількість домішок у чистій епоксидній смолі обмежена стандартом [4], у композитах нерідко використовується смола з різними мікроскопічними домішками. Ці домішки також можуть покращити характеристики отриманої деталі. Наприклад, при додаванні керамічних пудр поліпшується міцність композиту на згин [10], також нерідким є додавання карбону в різних виглядах: карбонових трубок [11] чи графін оксиду [12] та ін.

Отже, властивості композитів можуть сильно залежати від полімерної матриці. Дослідження та використання цього на виробництвах для виготовлення більш якісних деталей складної форми може принести користь у майбутньому.

#### Список використаних джерел

- [1] Ngo, TriDung(T.-D.). (2020). Introduction to Composite Materials. 10.5772/intechopen.91285.
- [2] ISO 4618-2023 Paints and Varnishes. Vocabulary
- [3] ДСТУ 2093-92 «Смоли епоксидно-діанові неотверджені»
- [4] ДСТУ ISO 4895:2007 «Пластмаси. Рідкі епоксидні смоли. Визначення тенденції до кристалізації»
- [5] Barbero, Ever J. Introduction to composite materials design / Ever Barbero. Description: Third edition. | Boca Raton : Taylor & Francis, CRC Press, 2017, ISBN 9781138196803
- [6] Bard, Simon & Demleitner, Martin & Weber, Regino & Zeiler, Rico & Altstädt, Volker. (2019). Effect of Curing Agent on the Compressive Behavior at Elevated Test Temperature of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Composites. *Polymers*. 11. 943. 10.3390/polym11060943.
- [7] Liang, J.; Liu, L.; Qin, Z.; Zhao, X.; Li, Z.; Emmanuel, U.; Feng, J. Experimental Study of Curing Temperature Effect on Mechanical Performance of Carbon Fiber Composites with Application to Filament Winding Pressure Vessel Design. *Polymers* **2023**, *15*, 982. <https://doi.org/10.3390/polym15040982>
- [8] Zaky Fadlurrahman, Daffa Alandro, Gil Nonato C. Santos, Muhammad Akhsin Muflikhun, Mechanical and chemical properties of matrix composite: Curing agent ratio, degassing process, and filler effect perspectives, *Journal of Engineering Research*, Volume 11, Issue 4, 2023, Pages 488-497, ISSN 2307-1877, <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100120>.
- [9] Sambayi P, Heyns P. Effects of multiple post cure cycles on properties of composite carbon fibre and epoxy materials. *Journal of Composite Materials*. 2023;57(15):2467-2481. doi:[10.1177/00219983231169333](https://doi.org/10.1177/00219983231169333)
- [10] Ergün, Yelda. (2019). Mechanical Properties of Epoxy Composite Materials Produced with Different Ceramic Powders. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 07. 1-8. 10.4236/msce.2019.712001.
- [11] Barra, G.; Guadagno, L.; Vertuccio, L.; Simonet, B.; Santos, B.; Zarrelli, M.; Arena, M.; Viscardi, M. Different Methods of Dispersing Carbon Nanotubes in Epoxy Resin and Initial Evaluation of the Obtained Nanocomposite as a Matrix of Carbon Fiber Reinforced Laminate in Terms of Vibroacoustic Performance and Flammability. *Materials* **2019**, *12*, 2998.

[12] Sharma H, Kumar A, Rana S, Guadagno L. An Overview on Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Composites: Effect of Graphene Oxide Incorporation on Composites Performance. *Polymers (Basel)*. 2022 Apr 11;14(8):1548. doi: 10.3390/polym14081548. PMID: 35458296; PMCID: PMC9032017.

## **ПОРІВНЯННЯ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ «АПАРАТ ІЛІЗАРОВА - КІСТКА» ПРИ ВИПРОБУВАННІ НА СТИСК**

*Демешко Я. В., студент; Дейлід Д. С., студент; Іщенко О. А., PhD, асистент;  
Мусієнко О. С. PhD, старший викладач*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського» м. Київ, Україна*

Наразі в сучасній медицині існує велика кількість систем зовнішнього остеосинтезу що застосовуються при переломах довгих кісток. Однак всі ці системи потребуються досліджень на жорсткість та деформівність. Це дослідження є досить комплексним, оскільки треба врахувати складність геометрії, тип перелому та анатомію пацієнта. Для такої задачі майже неможливо вивести аналітичне рішення. З розвитком інформаційних технологій та методу скінченних елементів (МСЕ) ця задача стала простішою. МСЕ може з доволі високою точністю визначати напруження та переміщення апарату зовнішнього остеосинтезу (АЗО). Цей метод базується на створенні скінченно-елементної сітки, тобто розбитті тіла на скінченні елементи (СЕ) і обрахунку кожного з них по певних точках – вузлах.

Основною проблемою у вивченні питань жорсткості та деформівності АЗО є створення «цифрового двійника» який буде відповідати реальному об'єкту.

Геометрична модель апарату Ілізарова була створена в середовищі тривимірного моделювання SolidWorks. Модель кістки була створена за допомогою знімків комп'ютерної томографії. Після чого моделі апарату та кістки були зібрані в одну збірку та експортовані в формат STEP для імпорту в програму для розрахунку за допомогою МСЕ.

Точність СЕ сітки визначається наступними параметрами: Skewness (асиметрія) та Orthogonal Quality (ортогональна якість). Параметр Skewness показує наскільки рівностороння або рівнокутна площина або клітинка. Значення для цього параметру повинні бути близькими до 0, де 0 – це найкращий показник, 1 – найгірший. Параметру Orthogonal Quality показує наскільки елемент по формі наближений до куба, для нього стіка повинна мати значення близькі до 1. Тобто 1 є найкращим показником, а 0 відповідно найгіршим [1].

Існує багато методів для побудови побудови СЕ сітки, в роботі розглянуто два. Перший - автоматичний, сітка будується в програмному модулі ANSYS Workbench за допомогою вбудованих алгоритмів модулю, що дозволяють накладати СЕ на імпортовану геометрію, однак для її якісної побудови треба задати певні параметри такі як розмір елемента, бажаний тип елементів та задати згущення сітки в місцях, де це необхідно. Другий спосіб – створення блочної структурованої гексагональна сітка в програмному комплексі ISEM CFD. Особливістю якого, є створення таких структурованих блоків за підготовленою геометрією.

Першою досліджуваною сіткою була автоматична, що була побудована в модулі Workbench. Для її побудови були задані наступні параметри: розмір елемента для всіх деталей апарату Ілізарова, крім спиць та кістки – 1 мм; розмір елемента для спиць та в контакті «кістка-спиця» - 0.5мм; всюди, де можливо був вибраний тип елемента «Hexagon», в місцях зі складною геометрією, де наявні криві поверхні та отвори в них, були створені елементи типу «Tetrahedral».

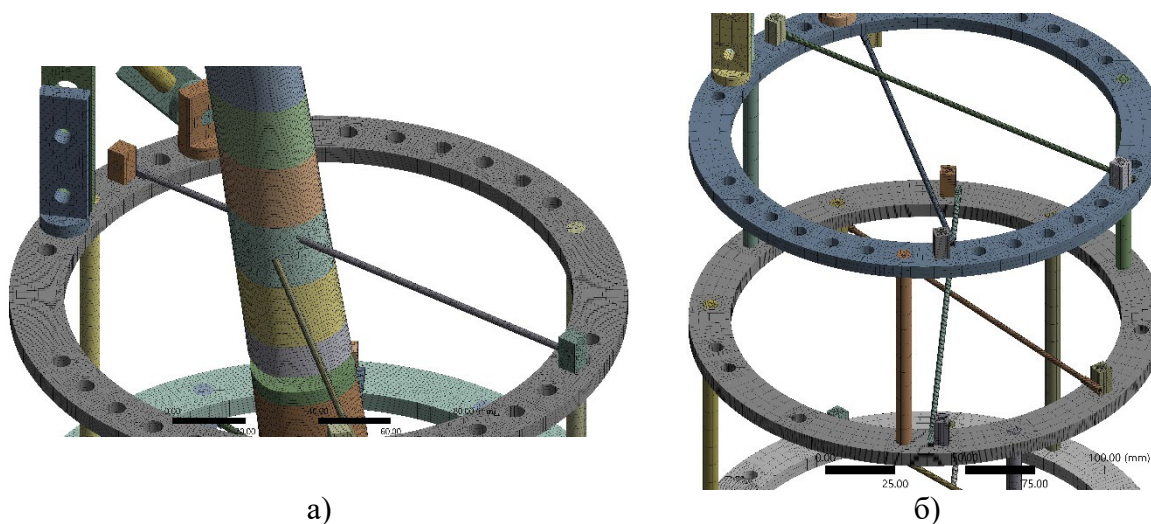


Рис. 1 SE сітки: а – автоматична сітка, б – «ICEM сітка»

Другим варіантом SE сітки стала «ICEM сітка». При її побудові контролюються параметри Skewness та Orthogonal Quality, щоб SE сітка була якісною. ICEM сітка будувалася лише для АЗО, для кістки булл використана автоматична сітка з розміром елемента 1 мм та типами елементів «Hexagon» та «Tetrahedral». Отримані сітки показані на рисунку 1. Автоматична сітка складається з 3589418 елементів та 6663681 вузлів, «ICEM сітка» складається з 3387606 елементів та 5383882 вузлів. Параметри якості для ICEM сітки вказані в таблиці 1.

Таблиця 1. Параметри якості для ICEM сітки

Skewness	
Кількість елементів, %	Якісний показник
79.78	0.05-0.35
18.49	0.35-0.65
1.73	0.65-0.95
Orthogonal Quality	
Кількість елементів, %	Якісний показник
1.05	0.05-0.35
4.12	0.35-0.65
94.83	0.65-0.95

Порівняння двох сіток проводилося за результатами скінченно-елементного моделювання з однаковими граничними умовами. Були використані крайові умови для стиску вздовж осі кістки [2].

В результаті роботи було створено 2 SE сітки, які можна застосовувати для розрахунків аналогічних моделей. Порівняння сіток проводилося по результатам чисельного моделювання. Були виведені переміщення точки прикладання сили вздовж осі кістки. Різниця між результатами складає 16%. Такий результат свідчить про прямий вплив SE сітки на результат чисельного моделювання. Для покращення результату слід робити сітку більш густою та якісною по вищевказаним параметрам для елементів зі складною геометрією.

#### Список використаних джерел

[1] Дейлід Д. С., Мусієнко О.С., Васильченко Б.М., Іщенко О.А., Модернізація скінченно-елементної моделі апарату зовнішньої фіксації. X Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених "Об'єднані наукою: перспективи міждисциплінарних досліджень", м. Київ, 2023р. / КНУ ім. Т. Шевченка. С. 76-78.

[2] Фам Д. К., Мусієнко О. С., Демешко Я. В., Визначення жорсткості апарату Ілізарова при різних навантаженнях за допомогою методу скінченних елементів. VIII Всеукраїнська конференція "Сучасні проблеми експериментальної та теоретичної фізики та методики навчання фізики", м. Суми, 24—26 жовтня 2022 р. / СумДПУ імені А. С. Макаренка. С. 76—78.

[3] ICEM CFD theory guide – Ansys inc, 2018.

**ЛАБОРАТОРІЯ НЕЙТРОННОЇ ФІЗИКИ В РЖЕЖІ ТА ЇЇ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ  
ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА МІКРОСТРУКТУРИ МАТЕРІАЛІВ В РАМКАХ  
ПРОЕКТУ NERNEWS**

**М.О. Дрозденко, к.ф.-м.н.**

<sup>1</sup> *Інститут ядерної фізики Чеської академії наук, Гусінець-Ржеж, Чеська  
республіка*

Проект NERNEWS може похвалитися партнерством, що складається з 21 науково-дослідної установи та двох організацій-користувачів. Лабораторія ядерної фізики (ЛЯФ) у складі інфраструктури Центру прискорювачів та ядерних методів аналізу (CANAM - Center of Accelerators and Nuclear Analytical Methods), та її обладнання для дослідження структури та мікроструктури передових матеріалів, входить в перелік науково-дослідних установ. Обладнання ЛЯФ включає в себе п'ять дифрактометрів нейтронів (сканування залишкових напруг, порошкова дифракція, розсіювання нейтронів під малим кутом, ін-ситу термомеханічні випробування та дифрактометр для тестування нейтронної оптики), три ядерно-аналітичні техніки (нейтронний профілінг глибини, активаційний аналіз швидких гамма-активаційний аналіз нейтронного активаційного аналізу) та інше супутні необхідні для експериментів інструменти. Схема представлена на рис. 1. Лабораторія надає відкритий доступ академічним користувачам на основі пропозицій, що постійно оцінюються міжнародною науковою відбірковою комісією. У грудні 2022 року NPL стала десятим учасником Ліги передових джерел нейтронів (LENS). LENS включає дослідницькі заклади європейського рівня, які підтримують міжнародну наукову спільноту, надаючи доступ до інструментів для науки з нейтронами. В рамках співпраці з LENS та іншими європейськими організаціями було створено трирічний проект NERNEWS, який стартував 1 січня 2024р.

Нещодавно декілька інструментів було модернізовано за допомогою нових нейтронно-оптичних компонентів, нового оточення зразків, а також фасилітетів для підготовки зразків та допоміжного обладнання. Сканер деформації був обладнаний радіальним нейтронним коліматором, дифрактометр SANS - новим гнучким тримачем з довгим аналізаторним кристалом. Нова портативна нейтронна камера сприяє налаштуванню зразка в межах середовища зразка. Була отримана система для одночасного інситу нейтронної дифракції, механічних випробувань та виявлення акустичних емісій. Ядерні аналітичні техніки були покращені за допомогою супердзеркального нейтронного провідника, електрохімічного імпедансного аналізатора, криогенного подрібнювача та електронного плавильного печі.

Представлені обрані приклади з досліджень за допомогою засобів фізики нейтронів, проведених в ЛЯФ: розподіл глибини Li в тонких літій-іонних акумуляторах [1], застосування нейтронного активаційного аналізу, механізми деформації в сплавах магнію [2], морфологія мезопористого силікату, структура складних металевих оксидів та залишкових напруг в сталевих компонентах, виготовлених методом вибіркового лазерного плавлення [3].

**Список використаних джерел**

- [1] I. Tomandl et al.: Analysis of Li distribution in ultrathin all-solid-state Li-ion battery (ASSLiB) by neutron depth profiling (NDP). *Rad. Eff. Def. Sol.* 175 (2020) 394. <https://doi.org/10.1080/10420150.2019.1701471>.
- [2] Advanced in-situ experimental techniques for characterization of deformation mechanisms in magnesium alloys. J. Dittrich, G. Farkas (NPI), D. Drozdenko, M. Knappek, K. Máthys, P. Minárik: *Journal of Alloys and Compounds* 937 (2023) 168388.
- [3] S. A. Ivanov (Uppsala University), P. Beran (NPI) et al, *Journal of Solid State Chemistry* 254 (2017) 166-177.

## ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ФАЗОВОГО МЕТОДУ ДО АНАЛІЗУ СПЕКТРІВ ЧАСУ ЖИТТЯ ПОЗИТРОНІВ

Дудник А.Б.<sup>1</sup>, н.с.; Крикля С. В.<sup>1</sup>, м.н.с.

<sup>1</sup>Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

В роботі [1] було розглянуто новий фазовий метод (ФМ) аналізу спектрів часу життя позитронів (СЧЖП або PALS спектрів). Основою цього методу є пошук вектора  $\mathbf{b}$  фізично значимих параметрів СПЧЖ з кількістю компонент  $L$  за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ), а саме, підгонка тангенсів фазових кутів комплексних ДПФ відліків моделі до тангенсів фазових кутів експериментального СЧЖП. Рішення знаходиться за рахунок мінімізації функціоналу

$$\Phi = \min \sum_k (TY_k - TF_k(\mathbf{b}))^2 \quad (1)$$

який призводить до рішення рівняння

$$\sum_k [TY_k - TF_k(\mathbf{b})] = 0 \quad (2)$$

де:  $TY_k$  — значення тангенсів експериментального СЧЖП, а  $TY_k(\mathbf{b})$  - значення тангенсів моделі.

В роботі замість експериментального СЧЖП використовувався двохкомпонентний тестовий модельний СЧЖП ( $L=2$ ), наведений на Рис. 1. Параметри спектру також наведені на рисунку.

На відміну до загальновідомого методу зваженої підгонки ( $\chi^2$ -методу) [2], у випадку ФМ використовувалася незважена підгонка, яка суттєво зменшила обсяг обчислень.

В роботі [1] було показано, що ФМ не дозволяє знайти єдине точне рішення для початкових параметрів  $\mathbf{b}=[\tau_l, I_l]$ , де  $l=1, \dots, L$ . Замість цього, при ФМ знаходиться сімейство оцінок  $\tau_{sl}, I_{sl}$ , які пов'язані співвідношенням

$$\tau_{av} \approx \sum_{l=1}^L I_{sl} \tau_{sl} \quad (3)$$

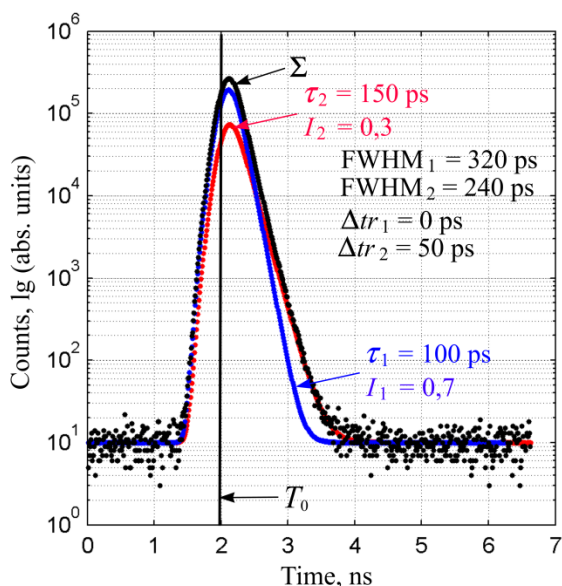


Рис. 1. Тестовий PALS спектр:  $y: N_0 = 10 \cdot 10^6, B = 10, \Delta t = 10$  ps.

1000 іспитів, який підтвердив правильність статистичних розрахунків. Результати статистичних розрахунків наведені у Табл.1.

де  $\tau_{av}$  є середня постійна часу. Це сімейство оцінок у роботі [1] називається фазовою траєкторією. Пошук оцінок виконувався за методом прямого пошуку.

В роботі [1] було показано, що оцінки  $\tau_{sl}, I_{sl}$  можна вважати ефективними, оскільки вони мають зневажливий зсув. При цьому одна з оцінок  $bs_l=[\tau_{sl}, I_{sl}]$  фазової траєкторії буде знаходитися на мінімальній відстані від точних параметрів  $\mathbf{b}=[\tau_l, I_l]$ .

Далі, у роботі [1] був виконаний статистичний аналіз, який показав, що статистичний розкид оцінок, знайдених при ФМ, є суттєво меншим за розкид, отриманий при використанні  $\chi^2$ -методу за допомогою програми POSITRONFIT [2]. Також, був виконаний обчислювальний експеримент за методом Монте-Карло з

Таким чином, ФМ не має ніяких переваг в порівнянні з  $\chi^2$ -методом у разі відсутності додаткової інформації про параметри СЧЖП, оскільки він призводить до неоднозначного рішення. Однак, у випадку, коли відомі деякі параметри СЧЖП, з'являється можливість

**Таблиця 1**

використовувати ФМ без  $\chi^2$ -методу, наприклад, для кількох досліджуваних зразків з однаковим хімічним складом, але різними концентраціями компонент у зразках. В цьому випадку для фазових траєкторій, отриманих для кожного зразка, знайдеться область, яка буде знаходитися на мінімальній відстані від точного рішення  $\mathbf{b}=[\tau, I]$  і буде мати суттєво менший статистичний розкид, ніж при  $\chi^2$ -методі. Такий випадок для 2 та 3 компонентів було розглянуто у роботі [1].

В алгоритмі, представленому у роботі [1], передбачалося, що параметри апаратної функції спектрометра часу життя позитронів відомі. В даний час розробляється алгоритм оцінювання цих параметрів при вимірюванні експериментальних СЧЖП на еталонному зразку, який має тільки одну відому компоненту, наприклад зразок  $\alpha$ -Fe. Також, після отримання параметрів апаратної функції на спектрометрі Інституту прикладної фізики НАНУ, для верифікації ФМ на експериментальних СЧЖП, передбачається виконати вимірювання на досліджуваних зразках з різними імплантованими профілями металів (наприклад Cu або Al) з товщиною 30-60 мкм.

Результати розрахунків флуктуацій оцінок постійних часу  $\sigma_{\Delta\tau_1}$  і  $\sigma_{\Delta\tau_2}$  двухкомпонентного спектру часу життя позитронів ( $\tau_1=100$  пс,  $\tau_2=150$  пс,  $I_1=0,7$ ,  $I_2=0,3$ ) для фазового методу при різних сумах відліків  $N_0$ , в порівнянні з  $\chi^2$ -методом.  $\sigma^{\Delta\tau}$  - флуктуації тангенса кутів комплексних відліків ДПФ,  $\eta$ -ефективний відносний шум при  $\chi^2$ -методі.

$N_0$	Параметр	Фазовий метод		$\chi^2$ - метод
		Метод Монте-Карло	Статистична оцінка	POSITRONFIT
$10^7$	$\sigma^{\Delta\tau}   \eta$	$1,67 \cdot 10^{-4}$	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$
	$\sigma_{\Delta\tau_1}$ , пс	0,137	0,136	1,1
	$\sigma_{\Delta\tau_2}$ , пс	0,281	0,285	1,9
$10^6$	$\sigma^{\Delta\tau}   \eta$	$5,30 \cdot 10^{-4}$	$5,39 \cdot 10^{-4}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$
	$\sigma_{\Delta\tau_1}$ , пс	0,622	0,620	3,05
	$\sigma_{\Delta\tau_2}$ , пс	1,58	1,571	8,19
$0,5 \cdot 10^6$	$\sigma^{\Delta\tau}   \eta$	$7,53 \cdot 10^{-4}$	$7,66 \cdot 10^{-4}$	$1,41 \cdot 10^{-2}$
	$\sigma_{\Delta\tau_1}$ , пс	1,07	1,08	6,96
	$\sigma_{\Delta\tau_2}$ , пс	2,85	2,88	13,20

#### Список використаних джерел

- [1] Dudnyk A.B. The phase method for analysis of positron lifetime spectra. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 1060 (2024) 169069.  
 [2] P. Kierkegaard. POSITRONFIT extended: a new version of a program for analyzing positron lifetime spectra. Computer Physics Communications. 1974, № 7, pp. 401-409.

## ВПЛИВ НАДКРИТИЧНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА СПІН-ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ЕФЕКТИ В ПРОЦЕСІ СИНХРОТРОННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Дяченко М. М., к.ф.-м.н., с.н.с.; Новак О. П., к.ф.-м.н., с.н.с.; Лебединський С. О., к.ф.-м.н., с.н.с.; Лебединська Ю. С., інж.; Холодов Р. І., д.ф.-м.н., чл.-кор. НАН України  
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

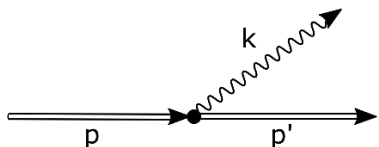


Рис. 1. Діаграма Фейнмана процесу магнітогальмівного випромінювання електрона

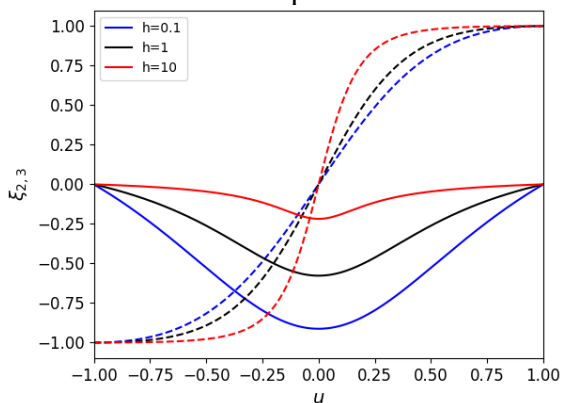


Рис. 2. Залежність параметрів Стокса синхротронного випромінювання від кута для різних значень магнітного поля (штрихова лінія відповідає  $\xi_2$ , а суцільна -  $\xi_3$ ,  $u = \cos\theta$ ,  $\theta$  - полярний кут вильоту фотона)

Актуальність теоретичного дослідження процесів квантової електродинаміки (КЕД), що відбуваються за присутності сильного зовнішнього магнітного поля, зумовлена наявністю таких фізичних об'єктів як нейтронні зірки, де магнітне поле досягає критичного значення  $H_c = m^2 c^3 / e \hbar \approx 4.41 \cdot 10^{13}$  Гс (пульсари) або й перевищує його (магнетари). Зокрема, в магнітосфері магнетарів значення напруженості магнітного поля досягає  $10^{15}$  Гс. В теоретичних моделях таких об'єктів елементарні КЕД процеси мають ключове значення, зокрема для опису створення плазми біля полюсів, випромінювання тощо [1, 2]. Незважаючи на великий обсяг робіт, присвячених дослідженню КЕД процесів в зовнішніх полях і досі залишається недостатньо вивченим вплив поляризації частинок на ймовірності процесів для випадку надкритичного магнітного поля, що і досліджується в даній роботі.

У ході дослідження було проаналізовано процес синхротронного випромінювання в умовах сильного магнітного поля (рис. 1). Були отримані аналітичні вирази для ймовірностей даного процесу при переході з першого

збудженого рівня Ландау для довільного магнітного поля та з врахуванням поляризацій частинок. Також було проведено аналіз впливу спіна початкового електрону на поляризацію фотона.

Показано, що коли випромінювання перпендикулярне полю, то для критичного значення поля ймовірність основного каналу процесу на порядок більша за спін-фліп канал, а у надкритичному режимі вони вирівнюються. Знайдено вирази для параметрів Стокса магнітогальмівного випромінювання для довільного магнітного поля. Показано, що ступінь поляризації  $P = 1$ , тобто випромінювання повністю поляризоване для обох випадків проекцій спіну початкових електронів. Знайдено, що для випадку випромінювання вздовж напрямку магнітного поля буде права циркулярна поляризація, а коли - перпендикулярно полю, то воно нормально поляризоване для основного спінового стану і аномально поляризоване для інверсного. При цьому зміна спіну початкової частинки змінює лише знак параметра Стокса  $\xi_3$ , що визначає лінійну поляризацію, але не змінює його модуль.

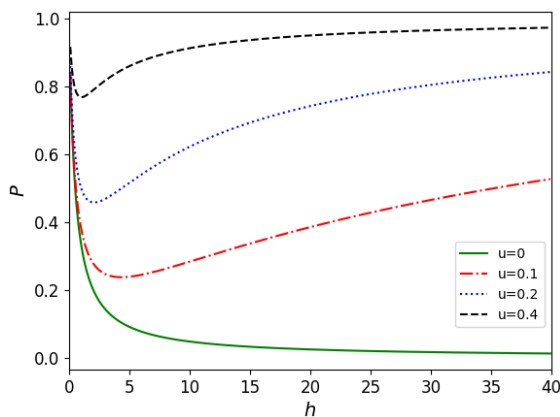


Рис. 3. Залежність ступеня поляризації випромінювання неполяризованими електронами від поля для різних кутів вильоту

ступеня поляризації. У випадку, ж коли  $u = \pm 1$  випромінювання повністю поляризоване. Збільшення ж магнітного в області  $u \neq 0$  призводить до того, що ступінь поляризації  $P \rightarrow 1$ .

#### Список використаних джерел

- [1] J. K. Daugherty, A. K. Harding, «Gamma-ray pulsars: emission from extended polar cap cascades» The Astrophysical Journal, vol. 458, p. 278, 1996.
- [2] A. K. Harding, «Physics in strong magnetic fields near neutron stars» Science, vol. 251, no. 4997, p. 1033, 1991.

### **ПРОФЕСІЙНА СПРЯМОВАНІСТЬ УРОКІВ ФІЗИКИ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ КОМПЕТЕНТНОГО ВИПУСКНИКА**

*Жигуліна В. І., викладач фізики*

*ДНЗ «Сумське міжрегіональне вище професійне училище», м. Суми, Україна*

Сучасний науково-технічний прогрес і наука стали визначними факторами в розвитку виробництва. Це вимагає від сучасних робітників глибоких знань для оволодіння новітньою технікою. Спеціальні знання, висока професійна підготовка стали обов'язковими умовами успішної праці.

Головне завдання викладача полягає в тому, щоб дати учням не лише знання з програмового матеріалу, а й вміння застосувати їх у професійній діяльності. Щоб розв'язати це завдання, я, як викладач фізики, впроваджую у навчання професійно спрямовані завдання. Важливим моментом є акцент на взаємозв'язку матеріалу з повсякденним життям, з предметами професійно-теоретичного циклу, виробничим навчанням, тобто, з майбутньою професією. Професійна спрямованість полягає в тому, щоб учні на практиці змогли використовувати знання, набуті на уроках фізики. Теоретичні і практичні положення фізики знаходять широке застосування в обраній учнями професії. Знання, не пов'язані з практикою, забуваються. Коефіцієнт корисної дії при вивченні фізики в такому випадку низький. Знання з фізики, пов'язані з практикою, життєвим досвідом, умінням застосовувати їх у нестандартних ситуаціях, більш міцні, стабільні, корисні.

На уроках використовую професійно спрямовані задачі, тестові завдання, кросворди, інтерактивні вправи.

При вивченні фізики є досить широкі можливості для професійної спрямованості навчання. Це дає можливість різносторонньо підходити до засвоєння знань як з професії, так і з фізики.

Реалізація професійної спрямованості у освітньому процесі сприяє кращому засвоєнню матеріалу, усвідомленню його прикладного спрямування. Робота над професійним спрямуванням фізики дає змогу зацікавити учнів, активізувати їхню роботу на уроках, підвищити фізичну культуру, що, безумовно, сприяє підвищенню ефективності освітнього процесу.

Пізнавальний інтерес тільки тоді матиме міцну основу для свого розвитку, коли зв'язок між змістом навчального матеріалу і його призначенням у житті знайде постійне місце у системі уроків. Особливо важливо показати учням практичне використання матеріалу, що вивчається на уроці. Так, під час вивчення явища інтерференції у групах які навчаються за професією «Слюсар з ремонту колісних транспортних засобів», «Електрогазозварник» пояснюють учням, яке велике значення воно має і як широко його використовують. Це і контроль якості обробки поверхні металевих деталей, вимірювання малих довжин і кутів, значення «просвітлення» оптичних приладів, визначення якості загартування металевих виробів за зміною кольору та інше.

Шляхи повідомлення учням про практичне використання фізичних законів і явищ може бути різним: під час мотивації навчальної діяльності, при поясненні нового матеріалу, під час актуалізації знань, під час закріплення вивченого матеріалу, при перевірці знань учнів, як домашнє завдання.

Завдання професійного характеру використовують на різних етапах уроку. Наприклад, для здобувачів освіти які навчаються за професією «Слюсар з ремонту колісних транспортних засобів», «Електрогазозварник» вивчаючи тему «Коливання та хвилі» на етапі закріплення нового матеріалу використовують такі задачі професійного спрямування:

1. Розрахувати період коливань поршня, якщо вал двигуна внутрішнього згорання обертається з частотою 800 об/хв.

2. Поршень двигуна внутрішнього згорання здійснює гармонічні коливання за законом  $x = 100\sin 2t$ , де всі величини задано в СІ. Визначити амплітуду, період і частоту коливань.

3. Для обмотки електронного генератора Г2-Б напруга змінюється за законом  $u = 17 \sin \omega t$  (В). Яке ефективне значення напруги?

4. Скільки коливань здійснить поршень в двигуні автомобіля за 5 с., якщо частота його коливань становить 440 Гц?

5. Зварник при зварюванні двох пластин робить електродом поперек шва рухи у вигляді вісімки, за 8 с зробив 32 коливання. Знайти період і частоту коливань електроду.

При вивченні розділу «Електродинаміка» здобувачам освіти які навчаються за професією «Слюсар з ремонту колісних транспортних засобів», «Електрогазозварник» на етапі мотивації навчальної діяльності пропонують наступні завдання професійного спрямування:

1. Тема уроку: «Електроємність. Конденсатори»

На уроках спецтехнології ви вже вивчали застосування асинхронних електродвигунів в однофазній мережі? Які особливості роботи електродвигунів? Які знання з фізики потрібні для цього?

Заслуховуються відповіді учнів.

Сьогодні на уроці познайомимося з приладом, який широко застосовується в електротехніці а також в ланцюгах змінного струму. Це конденсатор. Він може накопичувати великий електричний заряд а, отже, тісно пов'язаний з матеріалом, який ми вивчаємо. Отже, тема уроку: Електроємність. Конденсатори.

2. Тема: Змінний струм та його характеристики. Діючі значення напруги і сили струму.

Якщо підключити осцилограф до джерела змінного струму, то на екрані видно синусоїду. Який струм характеризує синусоїда? Це струм, який змінюється за величиною і напрямком. Сьогодні вивчимо, як одержується змінний струм, його характеристики, яке

явище лежить в основі роботи генератора змінного струму та автомобільного генератора, який є важливим елементом електрообладнання автотранспортного засобу.

При вивченні теми «Кристалічні та аморфні тіла» у групах за професією «Кухар», «Кондитер» для мотивації учнів пропоную завдання професійного спрямування: перед вами звичайнісінький цукор-пісок, рафінад та дві цукерки (карамель і ірис). Яка різниця в їх будові? Що спільного? Чим вони відрізняються? Як приготувати цукерку? Чи можна льодяник перетворити на цукор?

Під час актуалізації знань та умінь при вивченні теми «Вологість повітря» для здобувачів освіти які навчаються за професією «Кухар», «Кондитер» використовую такі проблемні питання:

1. Яка роль вологості повітря приміщення в процесі зберігання продуктів? Овочів? Фруктів?

2. Поясніть, чому важливим показником якості продуктів є вологість?

3. При зберіганні риби, масла, хліба, хлібобулочних виробів, кави, какао, спецій, сухого молока використовують стелажний спосіб, при якому продукти розташовують на полицях, шафах. В чому переваги такого способу?

Домашнє завдання також має професійне спрямування. Наприклад, підготувати повідомлення: «Значення вологості в професії кухаря», «Вплив вологості на якість зберігання продуктів харчування», «Умови зберігання харчових продуктів (круп, муки, овочів і фруктів і тд.)» та інші.

Вивчаючи тему «Молекулярна фізика» пропоную здобувачам які навчаються за професією «Кухар», «Кондитер» підготувати навчальний проєкт «Цукрові кристали».

Професійне спрямування завдань підвищує мотивацію до оволодіння професійними компетенціями, формує критичне мислення, тому в освітньому процесі є ефективним для здобувачів освіти.

Низький інтерес до вивчення фізики з боку учнів пояснюється тим, що вони не розуміють значущості предмета для оволодіння професійними знаннями, вміннями та навичками. Використання завдань професійного змісту сприяє свідомому засвоєнню курсу фізики, забезпечує розуміння учнями суті фізичних закономірностей, які вивчають. Такий підхід є одним зі шляхів реалізації ідей професійного спрямування викладання фізики.

### **САМОСТІЙНА РОБОТА СТУДЕНТІВ КОЛЕДЖУ З ФІЗИКИ В СУЧАСНОМУ ІНФОРМАЦІЙНОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

**Завражна О. М.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., доцент, викладач**

<sup>1</sup> Відокремлений структурний підрозділ «Машинобудівний фаховий коледж СумДУ»,  
Суми, Україна

В процесі навчання фізиці у коледжі особлива увага приділяється самостійній навчальній діяльності студентів та розвитку їх пізнавальної активності. Державні освітні стандарти ставлять перед викладачами завдання досягнення учнями не тільки результатів із засвоєння предмету, а й особистісних результатів, здатності до саморозвитку, що включають сформованість їхньої цілеспрямованої пізнавальної діяльності [1].

Пізнавальна активність проявляється у прагненні учнів самостійно набувати нових знань, готовності виявляти проблему і шукати шляхи її вирішення, застосовувати отримані знання на вирішення нових завдань.

Сучасне заняття з фізики обов'язково містить етап самостійної роботи, спрямований на засвоєння умінь самостійно діяти в різних навчальних ситуаціях на базі набутих умінь узагальнювати, систематизувати, аналізувати, припускати, застосовувати.

Для організації самостійної роботи на заняттях викладачами застосовуються як традиційні засоби, так і можливості інформаційних технологій, які визначають

інформаційне середовище. Сучасне інформаційне середовище надає широкі можливості для організації самостійної роботи студентів з фізики. Використання онлайн-ресурсів, інтерактивних симуляцій, віртуальних лабораторій та інших інструментів дозволяє зробити процес навчання більш цікавим, ефективним та сприяє розвитку пізнавальної активності учнів:

### 1. Візуалізація фізичних явищ:

- **Інтерактивні симуляції:** PhET Interactive Simulations: <https://phet.colorado.edu/> пропонує широкий спектр інтерактивних симуляцій з фізики, які дозволяють учням досліджувати різні фізичні явища в безпечному та візуально привабливому середовищі.

- **Відеодемонстрації:** Khan Academy: <https://www.khanacademy.org/> та інші освітні платформи пропонують безліч відеодемонстрацій з фізики, які допомагають учням візуалізувати складні концепції та явища.

- **3D-моделі:** Google 3D Warehouse: <https://3dwarehouse.sketchup.com/> та інші ресурси пропонують 3D-моделі фізичних об'єктів, які дозволяють учням краще зрозуміти їх будову та принципи роботи.

### 2. Інтерактивні завдання:

- **Онлайн-тести та вікторини:** Kahoot!: <https://kahoot.it/> та інші платформи пропонують інтерактивні тести та вікторини, які дозволяють учням у цікавій та ігровій формі перевірити свої знання з фізики.

- **Навчальні ігри:** Physics Playground: <https://sidequestvr.com/app/218/physics-playground-experimental> та інші ресурси пропонують навчальні ігри, які дозволяють учням у цікавій та невимушеній формі вивчити фізичні концепції.

### 3. Дослідницька діяльність:

- **Онлайн-бібліотеки та ресурси:** arXiv: <http://arxiv.org/> та інші онлайн-бібліотеки пропонують доступ до наукових статей та досліджень з фізики, що може бути корисним для учнів, які зацікавлені в поглибленому вивченні предмета.

- **Віртуальні лабораторії:** Labster: <https://www.labster.com/> та інші платформи пропонують віртуальні лабораторії, які дозволяють учням проводити досліди з фізики в безпечному та віртуальному середовищі.

### 4. Спілкування та співпраця:

- **Онлайн-форуми та чати:** Physics Forums: <https://www.physicsforums.com/> та інші онлайн-форуми та чати дозволяють учням спілкуватися з однолітками та вчителями з фізики, обговорювати складні питання та ділитися своїми знаннями.

Наведемо приклади завдань з фізики та методичні рекомендації для їх розв'язання з застосуванням інформаційного середовища:

#### 1. Завдання:

**Тема:** Механіка.

**Формулювання:** Визначте час, за який тіло, кинуте вертикально вгору, досягне найвищої точки.

#### Методичні рекомендації:

Для розв'язання цього завдання можна використовувати закон збереження механічної енергії.

Для візуалізації руху тіла, кинутого вертикально вгору, можна використовувати інтерактивну симуляцію з сайту PhET Interactive Simulations: <https://phet.colorado.edu/en/simulation/projectile-motion>, студенти можуть також використовувати онлайн-калькулятори для розрахунку часу польоту, висоти підйому та швидкості тіла.

#### 2. Завдання:

**Тема:** Молекулярна фізика.

**Формулювання:** Визначте середню швидкість молекул газу за заданої температури.

#### Методичні рекомендації:

Для розв'язання цього завдання можна використовувати закон розподілу Максвелла.

Для візуалізації молекулярного руху можна використовувати інтерактивну симуляцію з сайту PhET Interactive Simulations: <https://phet.colorado.edu/en/simulation/states-of-matter>, студенти можуть також використовувати онлайн-калькулятори для розрахунку середньої швидкості, середньої квадратичної швидкості та найбільш ймовірної швидкості молекул.

### 3. Завдання:

**Тема:** Квантова фізика.

**Формулювання:** Поясніть принцип фотоефекту.

**Методичні рекомендації:**

Для розв'язання цього завдання можна використовувати теорію фотоелектричного ефекту Ейнштейна.

Для візуалізації фотоелектричного ефекту можна використовувати інтерактивну симуляцію за посиланням <https://bit.ly/37qVuEr>.

Важливо зазначити, що використання інформаційного середовища має бути доцільним та відповідати цілям та завданням заняття. Викладач має чітко розуміти, які можливості інформаційного середовища він може використовувати для розвитку пізнавальної активності учнів на конкретному занятті.

### Список використаних джерел

[1] Закон України «Про освіту» від 5 вересня 2017 року №2145-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19#Text> (дата звернення: 08.04.2024)

## **РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ У НАВЧАЛЬНОМУ ПРОЦЕСІ З ФІЗИКИ**

*Іваненко М.В., магістрант; Салтикова А.І., к.ф.-м.н, доц.*

*Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Суми, Україна*

Мети базової загальної середньої освіти полягає у розвитку особистості учнів, формуванні їх загальної культури, наукового світогляду та стилю мислення, інтелектуальних та творчих здібностей, дослідницьких навичок, здатності до саморозвитку та самонавчання протягом життя тощо. Адже добре відомо, що "освіта - це те, що залишається, коли все вивчене забуде". Одержати спеціальні знання в галузі техніки і технології, сформувати культуру наукового мислення можна тільки на добротній основі природничо-наукової освіти, фундаментом якої служить фізика - наука про світ навколо нас, із законами якої ми стикаємося на кожному кроці. Проте результати соціологічних опитувань свідчать про різке зниження інтересу до фізики як навчального предмету.

Одна з причин неприйняття фізики - штучність пропонованих на уроках задач, їх відірваність від знайомої повсякденності. Однак, саме фізичні задачі можуть і повинні стимулювати пізнавальну активність та інтерес учнів. У психолого-педагогічній літературі немає єдиного, загально визнаного визначення поняття "задача", що пояснюється багатоплановістю можливих підходів до цього поняття.

Для практичної діяльності учителя фізики достатньо знання істотних ознак поняття "задача".

- У задачі розглядається ситуація, що пов'язана зі станом або поведінкою фізичних об'єктів (тіл, речовин, явищ, процесів).

- У формулюванні задачі є запитання (вимога), відповідь на яке може бути знайдена в результаті застосування законів, правил, формул, що описують фізичні об'єкти та їх поведінку.

- Розв'язування задачі передбачає подолання певного інтелектуального утруднення. Якщо пошук відповіді на запитання передбачає тільки відтворення вже відомого способу діяльності, то ми маємо справу не з задачею, а з вправою.

• У формулюванні задачі може міститися опис ситуації та всі вихідні дані, що потрібні для отримання відповіді на поставлене запитання (вимогу) задачі. Але задача може бути сформульована тільки у вигляді запитання або вимоги. У цьому випадку також відображені всі ознаки задачі, зокрема запитання (вимога) вказує на фізичний об'єкт, який треба аналізувати. У формулюванні задачі можуть бути як усі вихідні дані, так і частина їх. Відсутні дані знаходяться у процесі розв'язування задачі. Крім того, в умові задачі можуть бути дані, які не використовуються під час її розв'язування.

Під фізичною задачею розуміють деяку проблему, яку можна вирішити на основі законів фізики шляхом логічних умовиводів, з застосуванням математичних дій чи експерименту. У процесі розв'язку задачі вивчаються фізичні явища, формуються поняття, розвивається логічне мислення учнів і формуються навички застосовувати теоретичні знання на практиці. Можна констатувати, що розв'язування задач є невіддільною складовою навчання фізики. Під час розв'язування задач в учнів розвивається старанність, допитливість і самостійність суджень, зростає інтерес до вивчення фізики, розвивається здатність до аналізу та узагальнення явищ. Все це дозволяє говорити про розв'язування задач як про метод навчання. Можна стверджувати, що навчання фізики не може бути цілісним без розв'язування задач. Задачі з фізики широко використовуються для створення проблемних ситуацій, повідомлення нових знань, відпрацювання практичних навичок, перевірки глибини і міцності знань, закріплення матеріалу шляхом повторення, розвитку творчих здібностей учнів тощо. Отже, розв'язування задач є способом перевірки, систематизації та узагальнення знань, дозволяє раціонально повторювати, розширювати та поглиблювати знання, сприяє формуванню наукового світогляду та знайомить учнів з досягненнями науки і техніки.

## **ПРИСКОРЮВАЛЬНА ТРУБКА ДЛЯ ПРОТОННО - ПРОМЕНЕВОЇ ЛІТОГРАФІЇ**

*Ігнат'єв І. Г., к.ф.-м.н., с.н.с.; Колінько С. В., к.ф.-м.н, н.с.; Пономар'єв О. Г., д.ф.-м.н., зав. від.; Ребров В. А., к.ф.-м.н, с.н.с.*

*Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

На даний час в Інституті прикладної фізики НАН України (ІПФ НАН України) ведуться роботи з розробки та створення малогабаритної установки протонно-променевої літографії високої роздільної здатності [1].

У роботі [2] представлено концептуальний проект електростатичного прискорювача (ЕСП), що входить до складу установки.

Для отримання пучка протонів з енергією до 500 кеВ і струмом пучка до 1 нА в даному ЕСП використовується прискорювальна трубка (ПТ), виробництва фірми National Electrostatics Corp. (NEC) [3] (Рис. 1). Як дільник напруги ПТ служить система електродів

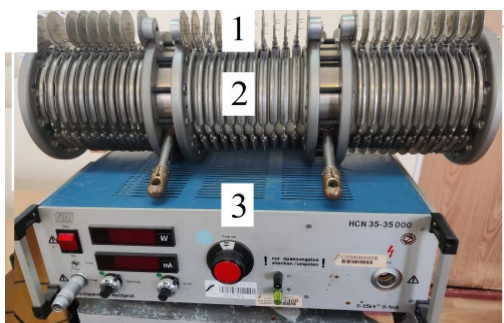


Рис. 1. Триплет секцій ПТ NEC: 1 — КДН, 2 — ПТ, 3 — ДВН

типу «голка-площина» (коронуючий дільник напруги, далі КДН) [4].

**Мета випробувань:** верифікація можливості застосування ПТ ЕСП на напругу до 200 кВ.

**Метод:** вимірювання вольт-амперних характеристик проміжку (ВАХ) ПТ.

**Методика:** Випробування проводилися на відкритому повітрі, при температурі навколишнього середовища  $t = 15 - 20^{\circ}\text{C}$ , атмосферному тиску  $P = 750 - 760 \text{ Torr}$  та відносній вологості повітря  $\omega = 50 - 90\%$ .

Джерелом живлення ПТ служило джерело високої напруги (ДВН) NCN 35-35000. виробництва фірми Fug (Гамбург, Німеччина) (Рис. 1).

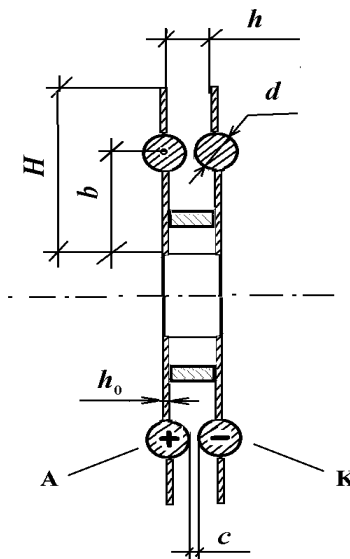


Рис. 2. Проміжок ПТ: А, К — електроди,  $H = 45$  мм,  $b = 37$  мм,  $h = 12$  мм,  $d = 8$  мм,  $h_0 = 0,5$  мм,  $c = 2$  мм  
універсальним є статистичний метод, заснований на чисельному моделюванні ймовірності пробую системи електродів (закон зростання) [5]. Метод був адаптований автором для високовольних прискорювачів прямої дії та вдосконалювався протягом більш як двадцяти років [6].

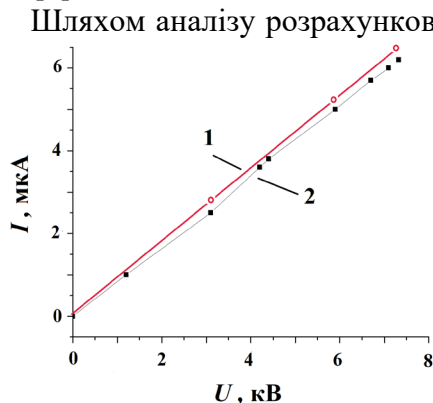


Рис. 3. ВАХ одного проміжку ПТ: 1 — розрахунок, 2 — експеримент. Кінцева точка залежно відповідає переходу коронного розряду в іскровий пробій

(Beam formation in high-resolution proton beam writing facility)» НАН України.

### Список використаних джерел

- [1] О. Г. Пономарьов, В. А. Ребров, та С. В. Колінько, «Устаткування протонно-променевої літографії на базі електростатичного прискорювача для фабрикації 3D мікро- і наноструктур» *Наука innov.*, 15(4), с. 62-69, 2019.
- [2] І. Г. Ігнат'єв та В. Б. Москаленко, «Прискорювач для протонно - променевої літографії» Сучасні проблеми експериментальної, теоретичної фізики та методики навчання фізики: матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з

### Електрична міцність ПТ

На Рис. 2 представлені основні параметри проміжку ПТ.

ВАХ проміжку ПТ представлена на Рис. 3. До  $U < 1$  кВ у проміжку протікають темнові струми близько 1 мкА. Вимірювання проводилися за методикою "вгору-вниз" [5].

Пробої (іскровий розряд) у зазорі ПТ виникають у сфері мінімальної відстані між електродами, де  $c = 2$  мм (рис. 2). Це розрядник ПТ.

Пробивна напруга  $U_{br} = 7,0$  кВ за н.у. (нормальних умовах – тиску повітря  $P = 760$  Торр, відносної вологості  $\omega = 70$  %, температурі  $t = 20^\circ$  С).

### Розрахунок пробивної напруги

Для розрахунку пробивної напруги високовольних структур найбільш універсальним є статистичний метод, заснований на чисельному моделюванні ймовірності пробую системи електродів (закон зростання) [5]. Метод був адаптований автором для високовольних прискорювачів прямої дії та вдосконалювався протягом більш як двадцяти років [6].

Шляхом аналізу розрахункових та експериментальних даних для електростатичного прискорювача на напругу 200 кВ проведено верифікацію методу для випадку повітряної газової ізоляції.

Похибка розрахунку становить величину порядку точності вимірювання напруги на електродах ПТ (менше 5%, Рис. 3).

Електрична міцність одного проміжку УТ становить 7 кВ (рис. 3). що дозволяє отримати робочу напругу ПТ (33 проміжки):

$$U_{max} = 0,93 \times 33 \times 7,0 = 214 \text{ кВ.}$$

Розрахункова робоча напруга склала 220 кВ (похибка розрахунку 3%).

Робота виконано у рамках теми НДР № III-110-20 номер держ. реєстрації 0120U101035 «Формування пучка в установках протонно-променевої літографії високої роздільної здатності

міжнародною участю, м. Суми, 24-26 жовтня 2022 р. / за ред. С. О. Лебединського, с. 25-26, 2022.

[3] R. Hellborg, *Electrostatic Accelerators Fundamentals and Applications*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.

[4] І. Г. Ігнат'єв, «Дільник напруги прискорювальної трубки для протонно - променевої літографії» Сучасні проблеми експериментальної, теоретичної фізики та методики навчання фізики: матеріали ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю, м. Суми, 11-12 квітня 2023 р. / за ред. С. О. Лебединського – Суми: ІПФ НАН України, с. 40 - 42, 2023.

[5] W. Mosch und W. Hauschild, *Hochspannungsisolierungen mit Schwefelhexafluorid*, Berlin: Verlag Technik, 1979.

[6] І. Г. Ігнат'єв, *Електрофізика електростатичних прискорювачів заряджених частинок (Дослідження високовольтної структури)*, Саарбрюккен: LAP, 2016.

### **ОПТИМІЗАЦІЯ ФОРМИ КУЛЬШОВОГО ІМПЛАНТУ**

**Іщенко В.А.<sup>1</sup>, учень; Вялітов І.Д.<sup>2</sup>, учень; Іщенко О.А.<sup>3</sup>, PhD, асистент;  
Мусяєнко О.С.<sup>3</sup>, PhD, ст. викладач**

<sup>1</sup>Хортицький академічний ліцей, Запоріжжя, Україна

<sup>2</sup>Запорізької Гімназії № 45, Запоріжжя, Україна

<sup>3</sup>КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

Імплантація, як метод відновлення тканин і органів, завжди була важливою, але з початком повномасштабного конфлікту її значення стало ще більш актуальним. Процедури імплантації стають вирішальним елементом в реабілітації і покращенні якості життя постраждалих [1].

Одним із ключових аспектів удосконалення якості лікування є розвиток імплантів, які б мали меншу вагу, кращу адгезію та зберігали високу міцність. Оптимізація форми імплантів стає надзвичайно актуальною, оскільки це дозволить забезпечити більш точне і ефективне відтворення втрачених тканин та органів у постраждалих осіб. Такі заходи допоможуть підвищити успішність процедур імплантації та сприятимуть швидшому відновленню та адаптації пацієнтів до повсякденного життя.

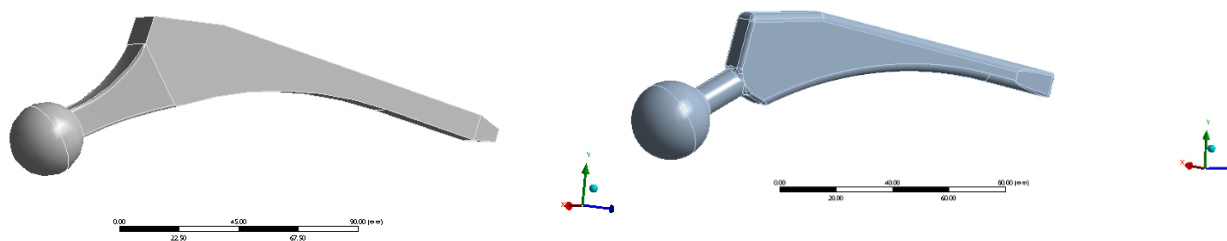


Рис.1. 3D моделі протезів I та II

Для оптимізації форм імплантів за основу були взяті стандартні моделі. Це дозволить уникнути необхідності в розробці з нуля нових інструментів для встановлення ендопротезів.

CAD-моделі імплантів створювались в середовищі Autodesk Inventor Student за розмірами реальних ендопротезів (рис. 1).

Після чого в САЕ середовищі ANSYS Student було виконана задача оптимізації для цих двох імплантів при двох видів навантаження: стиску та згину. З аналізу літературних джерел, відомо, що титан є одним з основних матеріалів для виготовлення ендопротезів. З внутрішньої бібліотеки ANSYS GRANTA були взяті основні механічні характеристики титану і записані в табл. 1.

Таблиця 1

## Механічні характеристики титану з бібліотеки ANSYS GRANTA.

Густина, кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга (модуль пружності), МПа	Коефіцієнт Пуассона, -	Границя міцності, МПа
4429	$1,11 \cdot 10^5$	0.3387	918

Граничні умови, що були застосовані для обох імплантів при дії усіх навантажень показані на рис. 2. Таким чином проведена симуляція вже імплантованого протезу в тіло, де жорстке защемлення (без повороту та без переміщення) накладено на ніжку протезу, а на головку діє сила 1000 Н (що відповідає 100 кг ваги). Слід зазначити що для стиску сила діє вздовж тіла протезу, а при згині повернута на 90 градусів від осі.

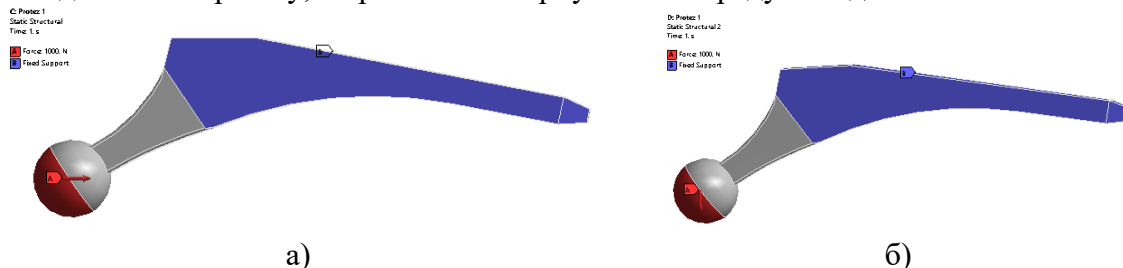


Рис. 2. Граничні умови для протезу: а)- при стиску, б)- при згині  
В результаті порохована задача оптимізації для двох протезів показана на рис. 3.

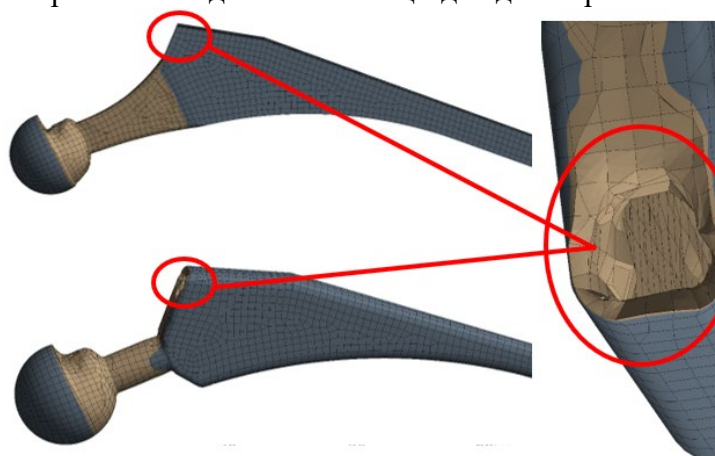


Рис. 3. Результати задачі оптимізації для двох протезів з відкинутою масою (елементами)

З рисунків видно, що найменш навантаженою є ніжка протезу, тому її можна спростити, зробивши у вигляді ферми як показано на рис. 4.

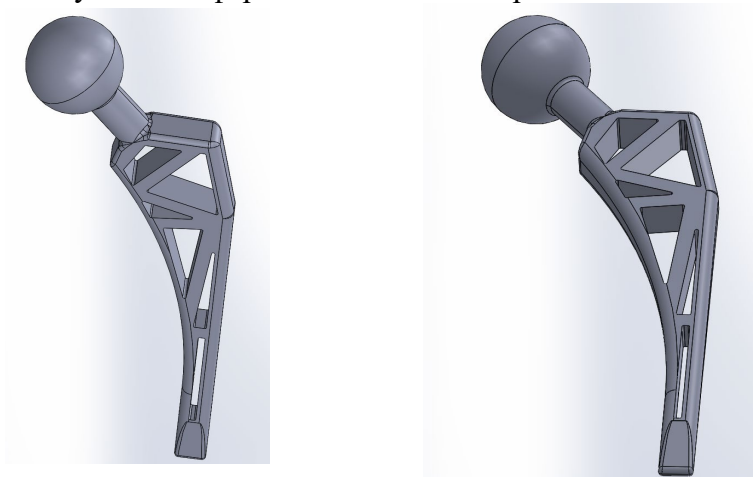


Рис. 4. 3Д модель створеного ендопротезу

За результатами дослідження було отримано модель імпланту, яка має меншу вагу, в порівнянні зі стандартними моделями, мінімум на 20%, що призводить до кращого зрощення імпланту та кістки.

#### **Список використаних джерел**

[1] І. Ю. Худецький, Ю. В. Антонова-Рафі, Г. В. Мельник, Є. В. Сніцар, *Протезування та штучні органи: Конспект лекцій*, Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.

### **ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ З ФІЗИКИ ЯК МЕТОД ФОРМУВАННЯ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ КУЛЬТУРИ УЧНІВ**

**Каленик М.В., к.пед.н., проф.; Гриценко Р.О., магістрант.**

*Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Суми, Україна*

Сучасний світ динамічно розвивається, вимагаючи від людей не лише знань, а й умінь досліджувати, генерувати нові ідеї та знаходити нестандартні рішення. Тому одним із пріоритетів освіти стає формування дослідницької культури учнів. Лабораторні роботи з фізики відіграють важливу роль у цьому процесі, адже вони дають можливість учням:

- Ознайомитися з науковим методом дослідження (ставити запитання, формулювати гіпотези, планувати експерименти, збирати та аналізувати дані, робити висновки).
- Розвивати практичні навички: працювати з лабораторним обладнанням, проводити вимірювання, обробляти результати дослідів.
- Стимулювати пізнавальну активність (самостійно досліджувати фізичні явища, шукати відповіді на запитання, робити відкриття).
- Формувати творче мислення (генерувати нові ідеї, знаходити нестандартні способи вирішення проблем).
- Виховувати відповідальність, самостійність, акуратність, наполегливість [1].

Лабораторні роботи з фізики мають ряд переваг порівняно з іншими методами навчання:

- Практична спрямованість (учні не просто отримують теоретичні знання, а й набувають досвіду практичного застосування цих знань).
- Наочність (досліди дають можливість учням наочно бачити фізичні явища, що сприяє кращому засвоєнню матеріалу).
- Інтерактивність (лабораторні роботи роблять процес навчання більш цікавим та захоплюючим, адже учні стають активними учасниками дослідницького процесу).
- Розвиток особистих якостей (лабораторні роботи сприяють розвитку таких особистих якостей, як самостійність, відповідальність, креативність, критичне мислення).

Для того, щоб лабораторні роботи з фізики максимально ефективно сприяли формуванню дослідницької культури учнів, важливо дотримуватися таких методичних рекомендацій [2].

1. Обґрунтування важливості лабораторних робіт у навчанні фізики: пояснити учням, чому важливо проводити лабораторні роботи; підкреслити значення практичного досвіду та вміння працювати з обладнанням.

2. Планування лабораторних робіт: визначити мету та завдання кожної лабораторної роботи; розробити послідовність дій, які необхідно виконати для отримання результатів; обговорити з учнями можливі методи дослідження та способи обробки результатів.

3. Безпека під час проведення лабораторних робіт: наголосити на важливості дотримання правил безпеки під час роботи з обладнанням та хімічними речовинами; забезпечити наявність захисного спорядження та екстрених заходів у разі аварійних ситуацій.

4. Оцінювання результатів лабораторних робіт: розглянути критерії оцінювання, відповідні до мети та завдань кожної роботи; запропонувати форми звітування, які дозволять учням систематизувати та аналізувати отримані результати.

5. Стимулювання інтересу до дослідницької діяльності: залучити учнів до формулювання гіпотез, власних питань та дослідницьких завдань; підкреслити важливість самостійного дослідження та висунення нових ідей.

6. Розвиток критичного мислення та аналітичних навичок: заохотити учнів до критичного аналізу отриманих результатів та формулювання власних висновків, обговорення різних точок зору та пошук альтернативних підходів.

Лабораторні роботи з фізики є цінним інструментом формування дослідницької культури учнів. Завдяки правильно організованій лабораторній роботі учні вчать досліджувати, творити, знаходити нестандартні рішення, а це, в свою чергу, робить їх більш конкурентоспроможними в сучасному світі.

#### Список використаних джерел

[1] Каленик В.І., Каленик М.В. Питання загальної методики навчання фізики. Пробний навчальний посібник. Суми. Редакційно-видавничий відділ СДПУ ім. А.С. Макаренка. 2000. 125с.

[2] Каленик М.В. Підвищення ролі лабораторних робіт при формуванні в учнів експериментальних умінь. Наукові записки. Випуск 8. Серія: Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти. Частина 1. Кіровоград. РВВ КДПУ ім. В. Винниченка. 2015. С. 118-122.

### **ВИКОРИСТАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ФІЗИЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ В УМОВАХ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ**

*Каленик М.В., к.пед.н., проф.; Кочмала О.С., магістрант.*

*Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Суми, Україна*

До основних переваг використання комп'ютерних симуляцій при вивченні фізики можна віднести такі: неможливість зупинити деякі експерименти у потрібному місці для детального розгляду явища, яке демонструється; необхідність додаткового самостійного перегляду та аналізу явища або процесу; необхідність виділення окремих складових частин обладнання; зміна темпу демонстрації; запобігання шкідливому впливу деяких явищ і процесів на організм людини; швидка корекція необхідних параметрів; використання паралельно з реальним експериментом, візуалізація ідеальних моделей; спостереження за фізичними процесами в їх розвитку тощо.

Особливої актуальності комп'ютерні симуляції набувають в умовах дистанційного навчання навіть при наявності відеозапису реального експерименту. Усі явища, які вивчаються в шкільному курсі можна змодельовати, розглянути будь-яку ситуацію і наочно продемонструвати за допомогою готових симуляторів, наприклад, Phet, The Physics Classroom, Khan Academy, Google Science Experiments, Wolfram Demonstrations Project або створити власну симуляцію, наприклад, за допомогою Adobe Animate. Існує багато різних програм для створення симуляцій. Деякі з них безкоштовні, але більшість – платні.

Під час створення і використання симуляцій треба дотримуватися кількох принципів:

- Визначте мету симуляції: Що ви хочете, щоб учні навчилися за допомогою симуляції?

- Створіть простий і зрозумілий інтерфейс: Симуляція повинна бути легкою у використанні для учнів.

- Перевірте симуляцію на точність: Переконайтеся, що симуляція правильно відтворює реальні явища.

- Надайте учням чіткі інструкції: Як вони повинні використовувати симуляцію?
- Обговоріть результати симуляції: Що учні дізналися з симуляції?
- Зробіть симуляцію цікавою та захоплюючою для учнів.
- Додайте до симуляції елементи гейміфікації.
- Використовуйте симуляції для оцінювання знань учнів.
- Створіть власні симуляції, які відповідають вашим потребам.
- Симуляції не повинні замінювати реальні експерименти.
- Симуляції повинні використовуватися як доповнення до традиційних методів навчання.

Частина учнів пасивно ставиться до сприйняття навчального матеріалу на уроці, оскільки у них немає звички завжди працювати уважно. Використання моделей сприяє якомога частішому зосередженню уваги учня, бо він сам себе змушує систематично й уважно ставитися до результатів своєї праці, розвиває самостійність і творчість мислення.

Отже, моделювання фізичних процесів і явищ дає можливість більш глибоко зрозуміти основи досліджуваних явищ шляхом візуалізації процесів, маючи різні параметри фізичної моделі. Разом з тим, швидкий розвиток комп'ютерної техніки та інформаційних технологій створює сприятливі умови для появи нових комп'ютерних експериментів і їх демонстрації в процесі викладення матеріалу та проведення лабораторних і практичних занять у закладах освіти, особливо в умовах дистанційного навчання.

#### Список використаних джерел

- [1] Каленик В.І., Каленик М.В. Питання загальної методики навчання фізики. Пробний навчальний посібник. Суми. Редакційно-видавничий відділ СДПУ ім. А.С. Макаренка. 2000. 125с.
- [2] Каленик М.В. Використання комп'ютера на уроках фізики в основній школі. Проблеми методики викладання фізики на сучасному етапі: збірник статей. Кіровоград. РВЦ КДПУ ім. В. Винниченка. 2000. С. 46 – 49.
- [3] Каленик М.В. Комп'ютерні демонстрації під час вивчення технічних пристроїв. Фізика та астрономія в школі. 2006. № 4. С. 50 – 54.

### **МЕТОДИКИ ТЕРМОДЕСОРБЦІЙНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВОДНЮ У МАТЕРІАЛАХ**

**Калінкевич О. М., к.ф.-м.н., с.д.; Чіванов В. Д., к.б.н., с.н.с.; Запорожець В. К., інж.; Новіков С. В., інж.; Калінкевич О. В., м.н.с.; Данильченко С. М., к.ф.-м.н., с.н.с.**  
*Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

Проведено калібрування установки TDMS (термодесорбційна мас-спектрометрія) за допомогою металогідридів. Завдяки виконаному калібруванню ми можемо кількісно визначити кількість водню, що виділяється на кожній стадії, і при деконволюції/розкладанні широкої смуги десорбції (піків, що перекриваються) на відносно вузькі піки десорбції, те ж саме можна зробити для кожного з цих компонентів. Це дозволяє нам отримати інформацію про відносну кількість водню, захопленого різними внутрішніми частинами металевих матеріалів.

Оптимізовано експериментальну установку та методики вимірювання кількісного вмісту водню в металах хроматографічним методом. Встановлено, що при мінімальних робочих об'ємах екстракційної камери зразки міді відносно невеликої маси (~100 мг), що характеризуються великим відношенням поверхня/об'єм, виділяють практично весь водень вже під час першого циклу нагрівання. Зразки більшого розміру (300-1800 мг) з нижчим співвідношенням поверхня/об'єм виділяють досить невелику частку загального водню під час першого циклу нагрівання; у наступних циклах виділення водню збільшується, а потім

падає до фонового рівня, оскільки виділяється весь доступний водень. Ці закономірності вказують на паралельне протікання поверхневих (десорбція/адсорбція) та об'ємних (дифузія водню) процесів під час термоекстракції. На основі отриманих результатів можна оцінити співвідношення поверхневої та об'ємної локалізації водню.

## **ДОМАШНІЙ ФІЗИЧНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ В СУЧАСНИХ УМОВАХ**

***Карпенко А.О., магістрантка; Салтикова А.І., к.ф.-м.н, доц.***

*Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Суми, Україна*

Фізика є фундаментальною наукою, тому при її вивченні вагоме значення має фізичний експеримент, адже в більшості знання з фізики базуються на експериментальних дослідженнях. Фізичний експеримент допомагає сформувавши правильні початкові уявлення про фізичні явища і процеси, розкриває фізичні закономірності, знайомить з методами дослідження, показує будову та принцип дії приладів і установок, ілюструє практичні та технічні застосування фізичних законів. За допомогою фізичного експерименту можна весь навчальний матеріал більш ґрунтовно конкретизувати, зробити більш зрозумілим і переконливим. Крім цього, він забезпечує формування в учнів необхідних практичних умінь, дослідницьких навичок і особистісного досвіду експериментальної діяльності та спонукає цікавість до вивчення фізики. Без експерименту немає і не може бути раціонального навчання фізики, бо одне словесне навчання фізиці неминуче приводить до формалізму і механічного заучування. Отже, органічною складовою методичної системи навчання фізики є навчальний фізичний експеримент, який реалізується завдяки демонстраційним і фронтальним експериментам, лабораторним роботам і короткотривалим дослідом, фізичному практикуму, навчальним проектам, позаурочним дослідом і спостереженням тощо. Завдяки цьому в учнів формуються експериментальні вміння, які мають складну структуру і включають вміння планувати, підготувати, спостерігати експеримент, вимірювати фізичні величини та обробляти отримані результати. Слід відмітити, що це досить довготривалий процес, він триває протягом усього навчання в школі. В останні роки, коли навчання в багатьох регіонах країни проводиться дистанційно, то саме домашній фізичний експеримент стає дуже на часі. Це простий самостійний експеримент, який виконується учнями вдома, поза школою, без безпосереднього контролю з боку вчителя. Можна виділити такі завдання при його проведенні: розширення зв'язків теорії і практики; формування вміння спостерігати фізичні явища в природі і у побуті; формування вміння виконувати вимірювання за допомогою вимірювальних засобів, що використовуються в побуті; формування інтересу до експерименту і до вивчення фізики; формування самостійності і активності. Домашні дослідом та спостереження є корисним доповненням до уроків фізики в школі. Критеріями відбору домашніх експериментальних завдань є: різноманітність їх характеру, наявність завдань, які передбачають використання довідкової літератури, ознайомлення з технічними побутовими приладами при їх виконанні, вимірювання фізичних величин, диференціація завдань, їх безпечність. Особливу увагу треба приділити саме безпечності проведення експериментів в домашніх умовах. Оскільки дослідом проводиться учнем вдома самостійно, без безпосереднього контролю вчителя, то при його проведенні не повинно бути ніяких хімічних речовин і предметів, що несуть загрозу для здоров'я дитини і її домашнім. Крім цього, експеримент не повинен вимагати від учня яких-небудь істотних матеріальних витрат, а використовувалися б лише предмети і речовини, які є практично в кожного вдома: посуд, банки, пляшки, вода, сіль тощо. Експеримент повинен бути простим по виконанню і устаткуванню, але цінним у вивченні і розуміння фізики та цікавим за змістом та спонукати до творчості. Результати досвіду повинні бути відповідно оформлені (за вимогою вчителя) та обговорені на уроці.

Слід констатувати, що у сучасному світі учням доступні найрізноманітніші джерела інформації, але часто саме наявність готової інформації сприяє розвитку пасивності у навчанні. Зникає прагнення до пошуку, пізнання, творчості, а, в майбутньому, і до наукової діяльності. Всебічний розвиток людини проявляється в її здатності до практичного застосування теоретичних знань, вмінні працювати з науковими та теоретичними матеріалами та в чіткому виконанні завдань різної складності. Отже, правильно підібрані домашні експерименти з фізики формують пізнавальні інтереси учнів, розвивають творчість та креативність, формують дослідницькі навички та науковий стиль мислення.

### **ВПЛИВ БАГАТОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ ЕЛЕКТРОДІВ НА ВИНИКНЕННЯ ВИСОКОВАКУУМНИХ ПРОБОЇВ.**

*Карпенко О.Ю., м.н.с; Батурін В.А., к.ф.-м.н., зав.лаб.; Роєнко О.Ю., м.н.с.  
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна.*

Під час створення прискорювачів нового покоління важливим фактором є боротьба з виникненням пробоїв у прискорювальних структурах. Для вивчення питання підвищення стійкості конструкційних матеріалів прискорюючих структур колайдери CLIC, в ІПФ НАНУ було запропоновано плазмову модифікацію поверхневих шарів цих матеріалів, та дослідити вплив такої модифікації на вірогідність високовольтних високо вакуумних пробоїв [1]. Одним із шляхів такої модифікації є нанесення багатошарових тонко плівкових покриттів на поверхню електродів з ціллю суттєвого зниження темного струму, а отже і підвищення стійкості до високовольтних пробоїв.

Внутрішня архітектура багатошарових захисних покриттів з різними властивостями дозволяє поліпшити якість покриття за рахунок ефекту періодичності, а також підібрати склад різних шарів таким чином, щоб задіяти різні механізми що впливають на покращення передпробійних характеристик і ці механізми можуть бути краще вираженими у тих чи інших шарах.

Багатошарові плівки були нанесені на мідні зразки методом ВЧ-магнетронного розпилення. Склад кожного шару та режими його отримання були підібрані з урахуванням попередніх експериментів, які показали найкращі результати. Дослідження зразків були проведені на установці [2], яка вимірює передпробійний струм, та фіксує напругу при якій виникають пробої. Порівняльні вимірювання модифікованої та не модифікованої поверхні

Таблиця 1

**Параметри наплення та характеристики пробою**

№ зразка	Параметри наплення плівок на мідні зразки			Відношення параметрів напруги міді із покриттями відносно чистої міді U/U(Cu)		
	Тип плівки покриття	Потужність Вч, W	Час наплення, min	Поява темного струму	Виникнення пробоїв	Необоротний пробій
106	ZnO	190	20	1.01	1.14	1.23
110	MoN	240	15	1.24	1.07	1.32
113	MoO	240	9	1,37	1,32	1,28
111	ZnO MoN	190 240	20 15	<b>1.7</b>	1.1	1.2
114	MoN MoO	240 240	15 9	1,28	<b>1,51</b>	1,24
133	MoO MoN	265 265	10 15	<b>1.8</b>	1.53	1.3
134	Mo MoO Mo MoO	265 265 265 265	1 5 1 5	<b>2.0</b>	1.2	1.25

надали можливість визначити ступень впливу модифікації поверхні на параметри пробою. У таблиці наведені параметри напilenня та характеристики пробою.

Структура з двошаровим покриттям із плівок WN та ZnO, де верхнім шаром є плівка MoN показала збільшення напруги виникнення перед пробійних струмів з 24% для зразка №110 з MoN покриттям до 70% для зразка №111 з двошаровою плівкою ( див. таблицю), у той час інші показники осталися без суттєвих змін.

Для двошарових плівок у яких верхнім шаром був MoO характерно покращення перед пробійних характеристик лише по одному параметру, а саме напругі при якій виникають пробої, яка збільшується на 50% (зразок №114). Інші параметри залишаються без суттєвих змін в порівнянні із одношаровою плівкою з MoO. Але якщо верхнім шаром у двошаровій структурі є MoN, то напруга виникнення струмів збільшується на 80%, пробої виникають при напругах на 53% більше ніж у міді, та напруга остаточного пробою збільшується на 30% (зразок №133). При цьому і перед пробійні струми стають значно меншими. Для чотирьохшарових покриттів з чергуванням слоїв Mo-MoO-Mo-MoO вдалося суттєво, а саме у два рази, збільшити високі напруги при яких виникають темнові струми. Інші характеристики також збільшилися, але на незначні величини, які не перевищували 20-25% (див. таб.). Такого результату вдалося досягти шляхом зниження енергії деформації, яка зумовлена різною кристалічною структурою завдяки підбору параметрів процесу напilenня.

Таким чином на пробивні характеристики зразків суттєво впливає багато факторів, таких як: послідовність нанесення шарів; їх товщина; хімічні зв'язки, які будуть виникати на межах розділу шарів та інші. Керуванням параметрами росту плівок, можна суттєво вплинути на кінцевий результат та отримати бажані властивості матеріалу.

#### Список використаних джерел

- [1] V.A. Baturin, A.Yu. Karpenko, V.E. Storizhko, V.A. Shutko, «INVESTIGATION OF COPPER SAMPLES WITH ION-PLASMA TREATMENT ON THE HIGH VOLTAGE BREAKDOWNS» ВАНТ. 2018. №4(116), с 297-301
- [2] V. A. Baturin, O. Yu. Karpenko, Ia.V. Profatilova, S. O. Pustovoitov, V. I. Miroshnichenko, «THE EXPERIMENTAL SETUP FOR HIGH VOLTAGE BREAKDOWN STUDIES IN THE HIGH VACUUM» ВАНТ, 2015, №4 (98), с. 294-297.

### **ФІЗИКА У ПРОФІЛЬНОМУ ЗАКЛАДІ СЕРЕДНЬОЇ ОСВІТИ (ПОГЛЯД МАТЕРІАЛОЗНАВЦЯ)**

**Кислюк В.В.<sup>1,2</sup>, к.ф.-м.н., с.н.с., вчитель фізики вищої категорії;  
Трачевський В.В.<sup>3</sup>, к.х.н., зав. лаб.**

<sup>1</sup> Інститут металофізики імені Г.В.Курдюмова НАН України, Київ, Україна

<sup>2</sup> Український фізико-математичний ліцей Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

<sup>3</sup> Лабораторія Діагностики наносистем та наноматеріалів, Технічний центр НАН України, Київ, Україна

Шкільний предмет «фізика» є продовженням такого предмету як «природознавство», який вивчають у початкових класах. Саме знайомлячись із фізикою, учень стикається з тим, про що згадував Резерфорд: «Вся наука – це або фізика або колекціонування марок» [1,2]. Це, перш за все, стосується того, що у процес навчання «втручається» математика, з допомогою якої можна не лише уявляти як відбуваються природні явища, але й роботи розрахунки для кількісного описання різних фізичних процесів, що вимагає додаткових знань та вмінь, пов'язаних з використанням математичних перетворень та розв'язанням математичних рівнянь. В цьому є основна відмінність між фізикою і природознавством. А

особливо ця відмінність має суттєво проявлятися у профільних закладах з поглибленим вивченням природничих і точних наук, зокрема фізики і математики. Передбачається, що учні, які зробили свій свідомий вибір на користь поглибленого освоєння саме цих предметів, мають бути готові, і навіть, здебільшого, розраховують на одержання більшого обсягу знань саме з цих предметів, порівняно з іншими закладами середньої освіти.

Наскільки поглибленою має бути така підготовка порівняно з іншими школами? На що вона має бути спрямована? Для яких фахівців у майбутньому вона має бути призначена? Чи повинна шкільна програма відображати сучасний стан науки?

Напевне, укладачі програми зі шкільного курсу фізики [3] задавали собі подібні запитання, які вартують окремого більш глибокого вивчення статистики подальшого працевлаштування випускників таких профільних шкіл. Ми ж лише окреслимо деякі проблеми та проілюструємо їх вирішення на окремих прикладах. Серед таких проблем виділимо п'ять, на наш погляд, найбільш важливих, які коротко назовемо так: *осучаснення*; *мультидисциплінарність*; *розсинхронізування* (програм з математики і фізики); *термінологія*; *PR* (Public Relations – зв'язок із громадськістю).

*Осучаснення.* Наука і технологія не стоять на місці, а програма вивчення фізики лишається майже незмінною упродовж багатьох десятиліть. Віддаємо належне багатьом піонерам-засновникам сучасних світоглядних засад, починаючи від давніх філософів до дослідників, що діяли на зламі 19-го – 20-го століть, а далі що? Процес пізнання зупинився? Та навіть погортати офіційну сторінку Нобелівського комітету достатньо, щоб побачити, що багато з того, що в курсі шкільної фізики подається як абстракція, як, наприклад, тиск світла, стає сучасним інструментарієм – Нобелівська премія 2018 року, присуджена Артуру Ашкіну, чий корені походять з Києва [4]. А щодо перших експериментів, які робились з наявними в ті далекі часи засобами, то на разі існують осучаснені постановки перших експериментів. До прикладу наведемо демонстрацію закону Кулона, запропоновану в Каліфорнійському університеті з використанням лазера, як елемента оптичного підсилювача, для реєстрації надмалих переміщень [5].

*Мультидисциплінарність.* Наведена диференціація проблем має досить відносний характер, оскільки між ними важко провести якісь межі. Насправді, вони тісно взаємопов'язані. Мультидисциплінарність як окрема особлива ознака сучасного стану науки, є наслідком того, що ідеї, явища і процеси, що спостерігали дослідники як деякі відсторонені факти, з часом знайшли своє застосування у вигляді створення певного інструментарію для подальших досліджень, і не тільки у царині фізики, але й у суміжних галузях: хімії, біології, медицині. Разом з тим, основні ідеї утворених інструментів якраз походять з базового курсу фізики. Наприклад, два таких поширених методи вивчення речовини як диференціальна скануюча калориметрія (ДСК) та ядерний магнітний резонанс (ЯМР) базуються на відомих з базового курсу фізики явищах – фазових переходах при зміні температури та взаємодії магнітного моменту (у випадку ЯМР – спіну ядра) зі схрещеними змінними та постійним магнітним полем. Останнє, було винайдено 80 років тому нашим співвітчизником із містечка Могилів-Подільський на Вінничині – Євгеном Завойським. На рис.1 ми подаємо результати нашого експерименту з вимірювання ЯМР на протонах для полімерного матеріалу етилен-вініл-ацетат (ЕВА), на якому проілюстровано, як фазові переходи у полімерному матеріалі приводять до звуження та розчеплення смуг ЯМР, що відповідає фазовому переходу – плавленню нанокристалітних частинок поліетилену, виявленому за вимірами ДСК [6]. Ці дані є результатом комплексної роботи, присвяченої вивченню довговічності інкапсулянтів сонячних батарей [7], але чітко відокремити фізичну частину від хімічної, експериментальну від технологічної неможливо.

*Розсинхронізування.* Програма фізики дещо обганяє програму математики. Але це не заважає надавати повноцінні знання з фізики, проходячи ситуативно необхідні розділи математики. Досвід показує, що навіть 8-класники спроможні розв'язувати систему лінійних рівнянь, складених за правилами Кірхгофа для аналізу розгалужених електричних схем, з використанням схеми Гауса.

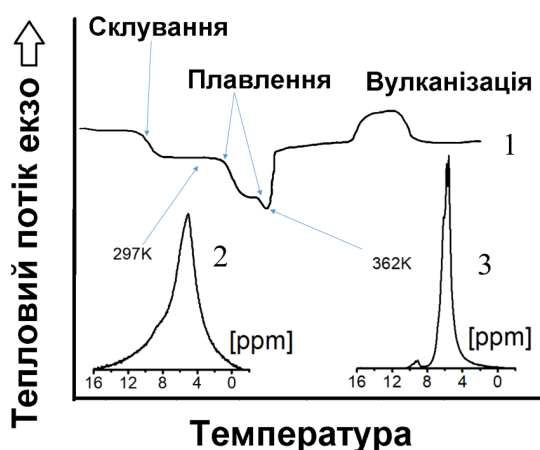


Рис. 1. Характеристики ЕВА: 1 – ДСК; спектр ЯМР на протонах.

*Термінологія.* З термінологією потрібно уникати новотворів, поки вони не стануть усталеними. Найкращий спосіб наводити терміни декількома мовами.

*PR.* В 2018 році до Києва приїздив Нобелівський лауреат 2012 року Серж Ареш. В червоному корпусі університету він прочитав захопливу лекцію «Жонглюючи атомами та фотонами в коробці». На жаль, на широкий загальний подія пройшла повз засоби масової інформації, за нечисленим винятком. Але для людей зацікавлених це було неабиякою подією. І добре, що такі люди є, дякувати науковцям, педагогам і організаторам таких заходів.

### Список використаних джерел

- [1] Oxford Essential Quotations, Ed. S. Ratcliff, 2016.
- [2] <https://www.patreon.com/posts/did-rutherford-23413944>
- [3] <https://mon.gov.ua/ua/osvita/zagalna-serednya-osvita/navchalni-programi>
- [4] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/ashkin/lecture/>
- [5] <https://youtu.be/p9R-0DN0Nrl?si=k1WORlixJMuRDl63>
- [6] Chae Eun Son, Sung-Seen Choi “Characterization of Poly(ethylene-co-vinyl acetate) (EVA) Using Thermal Analytical Techniques” *Elastomers Compos.* v. 54, No.1, pp. 61 – 69, 2019
- [7] V.V.Kislyuk, V.M.Shyvaniuk, V.V.Trachevskij, S.M.Ostapyuk, Yu.A.Polushkin, S.O.Kotrechko “Mechanical properties of the encapsulant material for photovoltaics” *J. Mater. Sci.* v. 57, pp. 21117 – 21134, 2022
- [8] <https://knu.ua/ua/news/9612>

### МОДЕРНІЗОВАНИЙ АЛГОРИТМ КАЛІБРУВАННЯ МАНОМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТИПУ ПМТ-2, ПМТ-4М, СК-ТП4

*Коломієць В. М., к.ф.-м.н.; Кравченко С. М. м.н.с.; Канівець В. М., гол. інж.  
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

Датчики вакууму є невід'ємною частиною вакуумних систем, які дозволяють оцінювати показники тиску та здійснювати контроль за перебігом технологічних процесів. Вакуумні датчики тиску набули широкого застосування в таких галузях науки і техніки, як: наплення тонких плівок, виробництво сонячних панелей та напівпровідників, вакуумне пакування та сушіння, вакуумні печі, виробництво композитних матеріалів для космічної та авіаційної промисловості тощо.

На сьогодні на підприємствах, в наукових і навчальних лабораторіях досить часто використовуються манометричні перетворювачі типу ПМТ-2, ПМТ-4М, СК-ТП4, які потребують кожного місяця ручного калібрування [1]. Для цього, згідно вказівок по експлуатації, необхідно при залишковому тиску в вакуумній камері менше  $10^{-4}$  мм рт. ст. ( $1,33 \cdot 10^{-2}$  Па) встановити такий струм, при якому термопара генерує напругу 10 мВ. Зазвичай, для проведення такого калібрування необхідне використання вакуумметра типу ВІТ-2 або ВІТ12Т4.

Авторами роботи пропонується новий алгоритм калібрування манометричних перетворювачів типу ПМТ-2, ПМТ-4М, СК-ТП4 та модернізована електрична схема вакуумного контролеру зі стабілізацією струму на базі сучасних радіокомпонентів.

Струм, що проходить через підігрівач термопари, встановлюється одноразово рівний максимальному струмові для термопарного перетворювача. Кожній точці типової градуовальної кривої манометричного перетворювача приписується певний коефіцієнт  $K$ , який рівний відношенню вихідної напруги  $U_{вих.}$  до напруги  $U_{вих.макс.}$  при тиску в вакуумній камері менше  $10^{-4}$  мм рт. ст. При калібруванні вимірюється і «запам'ятовується» контролером напруга  $U_{вих.макс.}$ , а залишковий тиск визначається опосередковано по графіку залежності тиску  $P$  від коефіцієнту  $K$ , що суттєво спрощує калібрування.

Для прикладу приведемо графік залежності залишкового тиску в вакуумній камері від коефіцієнту  $K$  (рис. 1.) для перетворювача манометричного термопарного ПМТ-4М.

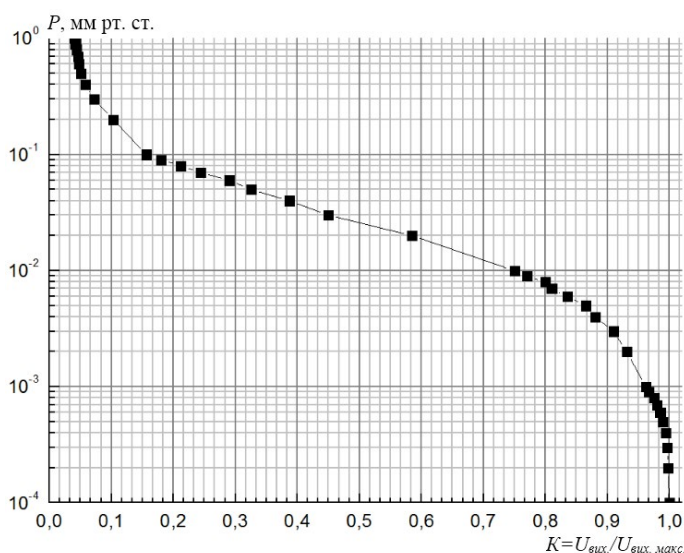


Рис. 1. Графік залежності залишкового тиску в вакуумній камері від відношення вихідної напруги до напруги при тиску в вакуумній камері менше  $10^{-4}$  мм рт. ст.

Для перевірки точності показів манометричного перетворювача ПМТ-4М після калібрування за новим алгоритмом, в якості еталонного, був використаний датчик вакууму Varian FRG-700 [2], який має суттєво кращі характеристики порівняно з ПМТ-4М:

- діапазон вимірювання:  $3,8 \cdot 10^{-9}$  – 760 мм рт. ст. ( $5 \cdot 10^{-9}$  – 1000 мбар);
- точність  $\pm 30$  %;
- відтворюваність  $\pm 5$  %.

Отримані порівняльні результати вимірювання залишкового тиску в вакуумній камері за допомогою датчиків вакууму ПМТ-4М і Varian FRG-700 дозволяють стверджувати, що тиск

в вакуумній камері після нового алгоритму калібрування вимірюється з точністю не гірше, ніж гарантується в паспорті на перетворювач манометричний термопарний ПМТ-4М [1]. Модернізована електрична схема контролеру може бути як самостійним приладом, так і може бути інтегрована в електричну схему вакуумної установки та значно спростить процес калібрування датчиків вакууму.

#### Список використаних джерел

- [1] Перетворювач манометричний термопарний ПМТ-4М. Паспорт.
- [2] Agilent Inverted Magnetron Pirani Gauge FRG-700 and FRG-702. Manual.

### РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІАЦІЙНО ІНДУКОВАНОЇ СЕГРЕГАЦІЇ МЕТОДОМ РІХЕ

Крикля С. В.<sup>1</sup>, м.н.с.; Білик В.М., м.н.с. Сторіжко В.Ю., д.ф.-м.н, акад. НАН України  
<sup>1</sup> Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

Радіаційно-індукована сегрегація (RIS) – нерівноважний процес, який відбувається на стоках точкових дефектів під час опромінення сплаву за проміжної температури ( $T_{пл.} = 0,3-0,5$ ) [1]. Радіація створює кількість точкових дефектів, що значно перевищує рівноважну концентрацію. При проміжних температурах ці дефекти рухливі та переміщуються до

ділянок з низькою енергією, таких як поверхні, межі зерен, дислокації та інші поглиначі дефектів. Сегрегація відбувається, коли даний легуючий компонент має переважну асоціацію з потоком дефектів. Збагачення або збіднення кожного елемента відбувається

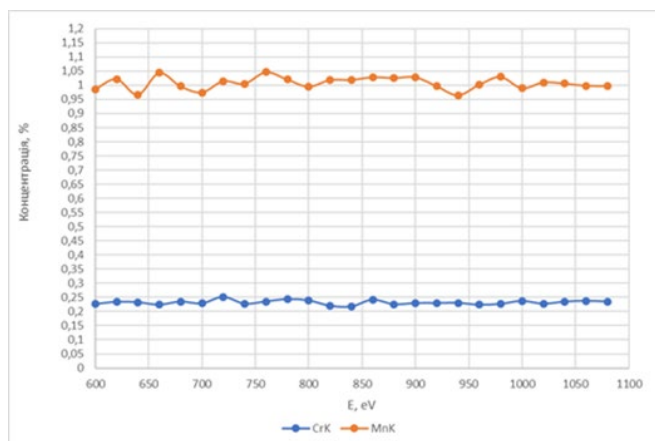


Рис. 1. Результати експериментального дослідження розподілу двох компонентів в сплаві 23Г1А по глибині

є експериментальне дослідження процесу. Формується досить багато методик, які мають на меті дослідити протікання RIS в реальних матеріалах, з максимальною ефективністю. В нашому випадку, пропонується побудова концентраційних профілів за глибиною методом PIXE[2].

Основна ціль роботи - це відпрацювання експериментальної частини, визначення меж застосовності методики та виявлення основних напрямків покращення та подальшої розробки. На рисунку 1 представлено розподіл двох елементів в багатокомпонентному металі за глибиною.

#### Список використаних джерел

- [1] Okamoto P. R. Radiation-induced segregation in binary and ternary alloys / P. R. Okamoto, L. E. Rehn. // Journal of Nuclear Materials. – 1979. – №83. – С. 2–23.
- [2] Billyk V. M. PIXE depth profiling of components in heavy-ion irradiated Zr alloys / V. M. Billyk, O. M. Billyk, X. Wu. // 16th International Conference on Particle Induced X-ray Emission. – 2019. – №16. – С. 42

### **РОЛЬ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВКРАПЛЕНЬ У ПОЛЬОВИЙ ЕМІСІЙНИЙ СТРУМ З КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИСКОРЮВАЧІВ**

*Лебединська Ю. С., аспірантка; Лебединський С. О., к.ф.-м.н., в.о. с. н.с.; Холодов Р. І., д.ф.-м.н., чл.-кор. НАН України, в.о. директора  
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

Під час проходження пучка заряджених частинок стінки конструкцій прискорювача опромінюються. Одним з типів радіаційних дефектів, що утворюються під час опромінення, є пори. Під час дослідження конструкційних матеріалів майбутнього CLIC (Compact Linear Collider) було виявлено, що поверхневий шар міді (основного матеріалу майбутнього прискорювача) на глибині близько 0,5 мкм сильно уражений порами [1]. Тому ми теоретично дослідили вплив таких дефектів на струм польової електронної емісії, який вважається одним з важливих чинників пробою конструкцій прискорювача. Ми знайшли коефіцієнт тунелювання електронів через потенціальний бар'єр, який враховує нанорозмірні дефекти розміром  $d$  і глибиною  $h$  у поверхневому шарі металу, які можуть

бути заповнені діелектриком. Коефіцієнт прозорості потенціального бар'єру може бути представлений наступним чином:

$$D = \frac{4(C - \chi - W)W^2 e^{-\frac{4k(C-W)^2}{3eE}} \sqrt{C - W}}{(C - \chi) \left( (\sinh(\beta d) Y \sqrt{C - \chi - W} + \cosh(\beta d) \sqrt{W} \Lambda)^2 + WY^2 \right) - W^2 C} \quad (1)$$

де  $Y = \sqrt{C - W} \sin(\alpha h) + \cos(\alpha h) \sqrt{W}$ ,  $\Lambda = \sqrt{C - W} \cos(\alpha h) - \sin(\alpha h) \sqrt{W}$ ,  $\alpha = k\sqrt{W}$ ,  $\beta = k\sqrt{C - \chi - W}$ .

З формули (1) можна побачити, що струм польової емісії з системи метал-діелектрик-метал-вакуум сильно залежить від товщини діелектричного шару. Зі збільшенням товщини струм буде експоненційно зменшуватися. У той же час залежність від глибини розташування діелектричного шару знаходиться у аргументі синуса та косинуса. Це означає, що струм має носити осциляційний характер. Легко побачити, що умова максимуму буде:

$$h = \frac{\pi}{2\alpha} (2n + 1), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

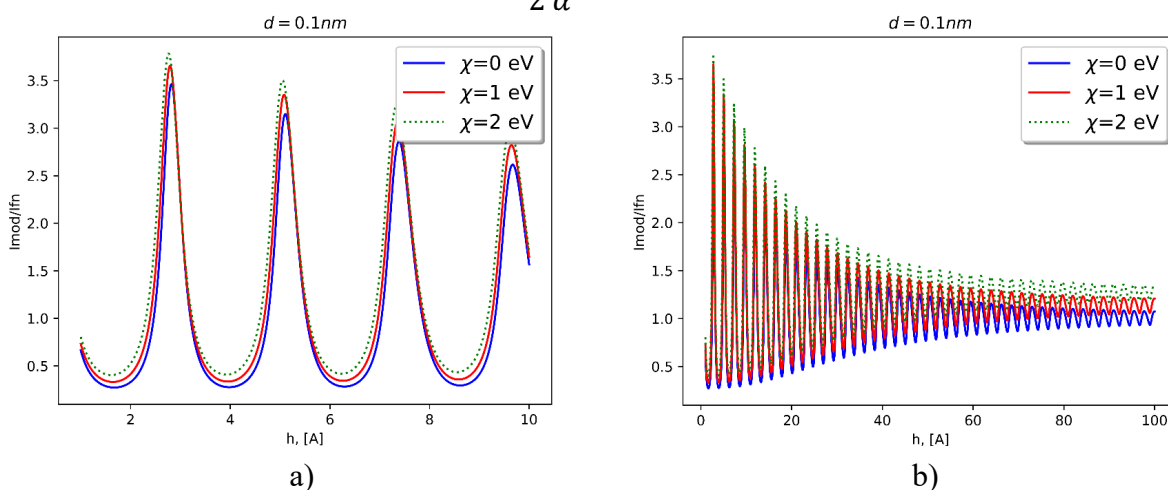


Рисунок 1. Порівняння величин густини струму польової емісії  $J_{mod}$  і  $J_{F-N}$  в залежності від  $\chi$  і  $h$ : а)  $h=0 \div 1$  нм, б)  $h=0 \div 10$  нм.

Також важливим є питання як зміниться густина струму польової електронної емісії з конструкційних матеріалів прискорювачів у випадку заповнення пор діелектриком, тобто із системи метал-діелектрик-метал-вакуум. При подальшому розгляді нами було обрано різні значення енергії спорідненості електрона в межах  $\chi = 0 - 2$  еВ. Це пов'язано з тим, що у порах такого розміру одночасно може розташовуватись лише декілька атомів. А енергії спорідненості газів, які зазвичай можуть знаходитись у порах, приймають значення у таких межах [2]. На рисунку 1 показано залежність польового емісійного струму, вираженого у одиницях струму Фаулера-Нордгейма, від глибини розташування дефекту у випадку різних енергій спорідненості  $\chi$ .

З рисунка 1 а) легко побачити, що характер струму, у випадку заповнення пор діелектриком, кардинально не змінився. Струм так само носить резонансний характер, а посилення струму, пов'язане зі зменшенням висоти сходинок у потенціального бар'єру (див. рисунок 2.1) не перевищує 10%. На рисунку 1 б) зображено аналогічний графік, але при більших глибинах залягання пори  $h$ . З нього можна зробити висновок, що наявність діелектричних краплень у приповерхневому шарі не змінює кардинальним чином характер емісійного польового струму, що емітується з поверхні у якій присутні пори.

#### Список використаних джерел

- [1] A. Lopez-Cazalilla et al, Effect of surface orientation on blistering of copper under high fluence keV hydrogen ion irradiation, *Acta Materialia*, 266, 2024, 119699.
- [2] [https://en.wikipedia.org/wiki/Electron\\_affinity\\_\(data\\_page\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Electron_affinity_(data_page)).

## ДОСЛІДЖЕННЯ ШИРИНИ РЕЗОНАНСНОГО ПІКУ КОЕФІЦІЄНТА ПРОЗОРОСТІ ПОТЕНЦІАЛЬНОГО БАР'ЄРУ У ВИПАДКУ МОДИФІКОВАНОЇ ПОВЕРХНІ МЕТАЛУ

*Лебединський С.О., к.ф.-м.н., в.о. с.н.с.; Лебединська Ю. С., аспірант; Холодов Р. І.,  
д.ф.-м.н., чл.-кор. НАН України, в.о. директора  
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

Дослідження залежності коефіцієнта прозорості потенціального бар'єру від енергії електронів, у випадку наявності пор у приповерхневому шарі металу, показує, що вигляд потенціального бар'єру є різним для різних параметрів системи, таких як розміри приповерхневих дефектів  $d$ , глибина їх розташування  $h$  та напруженість електричного поля  $E$ . Наприклад, на рисунку 1 зображено графіки залежності коефіцієнта прозорості потенціального бар'єру для різних значень глибини розташування пори  $h$ . Ми бачимо, що в залежності від  $h$  з'являється пік, ширина і розташування якого змінюється зі зміною  $h$ .

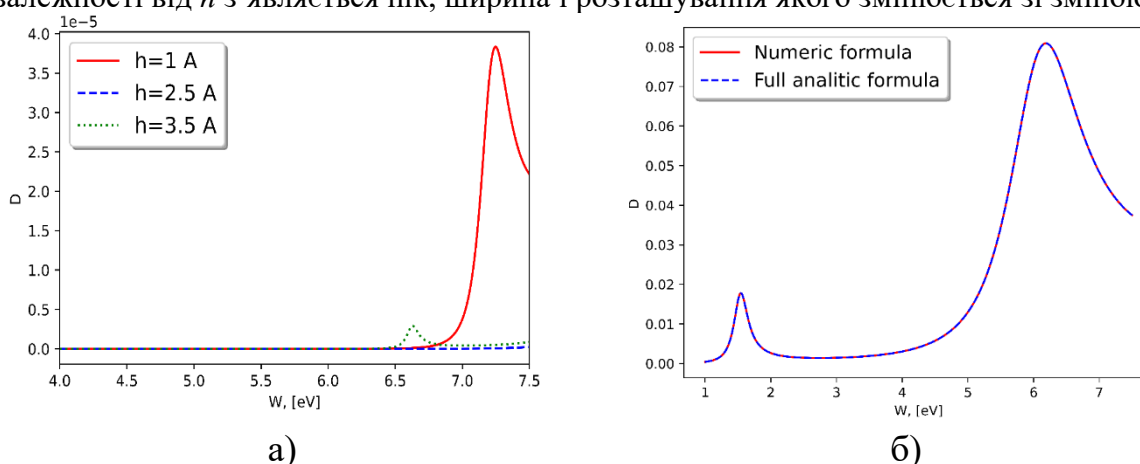


Рис. 1. Графічні залежності коефіцієнта прозорості потенціального бар'єру крізь систему метал-вакуум-метал-вакуум у залежності від енергії електрону: а) для різної глибини розташування пори  $h$ , б) для напруженості електричного поля  $E = 20 \text{ ГВ/м}$

З рисунку 1 також легко побачити, що коефіцієнт прозорості потенціального бар'єру з такої системи має кілька піків, які відрізняються розташуванням по енергетичній шкалі та їх величиною. Тому питання дослідження цих піків є важливою задачею, оскільки резонансний характер струму з таких структур може бути шляхом створення джерел електронів, що матимуть невеликий розкид електронів по енергіям.

Нами було досліджено залежність коефіцієнту прозорості потенціального бар'єру від енергії електронів при різних величинах розмірів дефектів  $d$  та глибини їх розташування  $h$ , точніше, більш універсальну величину: ширину піків на напіввисоті (англ. full width at half maximum, FWHM). Цей фізичний параметр відіграє надважливу роль, коли ми розглядаємо струм польової електронної емісії, оскільки це дає змогу проаналізувати електрони яких енергій будуть емітувати з поверхні металу з найбільшою ймовірністю. Для дослідження цього процесу нами було чисельно розраховано ширину найбільшого піку на напіввисоті на графіку залежності коефіцієнту прозорості потенціального бар'єру від енергії електронів, які падають на границю метал-вакуум з товщі металу. Ця ширина досліджувалась у залежності від розмірів дефекту  $d$  та глибини його розташування  $h$  для різних значень напруженостей електричного поля  $E$ . На рисунку 2 приведено графіки залежності ширини піків на напіввисоті від розмірів дефекту  $d$  у діапазоні значень від 1 до 3 ангстрем та глибини його розташування  $h$  у діапазоні значень від 0 до 10 ангстрем для різних значень напруженостей електричного поля.

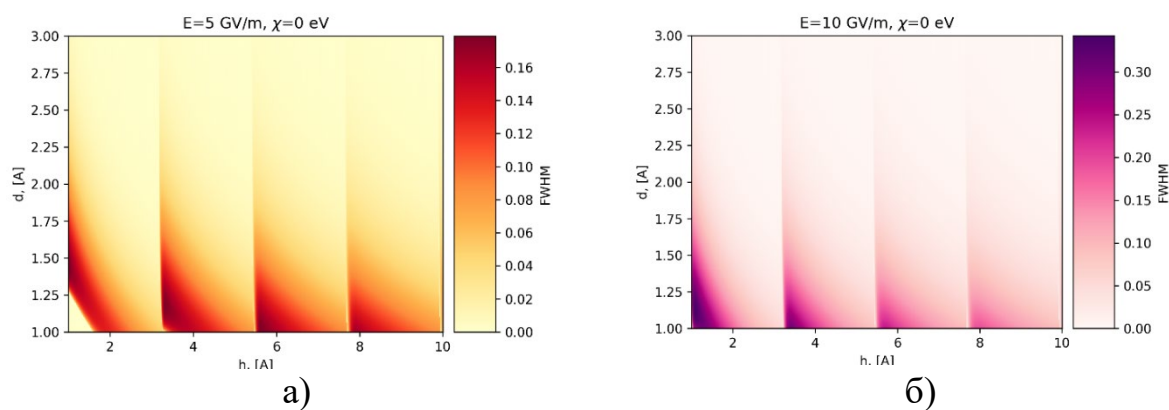


Рис. 2. Теплова карта залежності ширину піків на напіввисоті (FWHM) від розмірів дефекту  $d$  та глибини його розташування  $h$ : а) при  $= 5 \text{ ГВ/м}$ , б) при  $= 10 \text{ ГВ/м}$

З рисунка 2 добре видно, що ширина бар'єра має резонансний характер. Що узгоджується з роботою [1]. Відповідно можна зробити висновок, що області посилення електричного струму як раз відповідають областям найбільшої ширини резонансного піку. Також з рисунка 2 видно, що ширина резонансного піку для параметрів:  $E = 5 \text{ ГВ/м}$ ,  $C = 12 \text{ еВ}$ ,  $W_F = 7.5 \text{ еВ}$  не перевищує  $0.2 \text{ еВ}$ . Збільшення напруженості електричного поля у 2 рази приблизно у 2 рази збільшує ширину резонансного піку на графіку коефіцієнта прозорості потенціального бар'єру

#### Список використаних джерел

[1] I.I. Musiienko, S. O. Lebedynskiy, R. I. Kholodov "Nanoclusters and nanoscale voids as possible sources of increasing dark current in high-gradient vacuum breakdown" The European Physical Journal D, 2022, V. 76 (4), p. 1-10.

### **ПРОСТОРОВА КОГЕРЕНТНІСТЬ КОМПАКТНИХ ДЖЕРЕЛ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

*Лебедь О.А., д.ф.-м.н., с.д., Овчаренко А.Ю., аспірант; Стародуб С.С., к.ф.-м.н., с.н.с.  
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

Методи досліджень з використанням рентгенівського випромінювання (РВ) широко застосовуються в різних галузях науки та техніки, зокрема, для медичної діагностики та візуалізації. Розвиток технологій в області джерел РВ, оптики та детектуючих систем відкриває нові можливості в дослідженнях об'єктів. Ряд методик на сьогодні базуються на когерентних властивостях випромінювання, тобто аналізують зміни як амплітуди, так і фази випромінювання. Врахування фазової інформації допомагає підвищити чутливість та конструктивність отриманих зображень, роблячи їхнє використання більш ефективним у великому спектрі досліджень та діагностичних задач. Значні успіхи та важливі результати досліджень на джерелах синхротронного випромінювання поставили нове актуальне питання, а саме розвиток яскравих компактних джерел випромінювання з параметрами когерентності, що дозволяють реалізовувати фазо-інформативні методи.

Аналіз характеристик сучасних компактних джерел РВ показує, що для більшості типів джерел ускладнюється необхідністю фільтрації спектру випромінювання та досягненням необхідного ступеню просторової когерентності. Найбільші перспективи для широкого застосування в цьому напрямі мають мікрофокусні рентгенівські трубки та джерела на основі прискорювачів: джерела перехідного випромінювання, джерела на основі зворотного розсіювання Комптона та джерела на базі прискорювачів іонів.

В рентгенівському діапазоні хвилі цікавим для розгляду є випадок частково когерентного випромінювання. Для опису такого випадку зручно користуватися поняттями

взаємної інтенсивності та комплексного ступеню когерентності випромінювання на поверхні спостереження. Згідно теореми Ван-Циттерта–Церніке [1,2] взаємна інтенсивність для точок на площині спостереження  $P_1$  та  $P_2$ , що опромінюється некогерентним джерелом  $\sigma$ , визначається наступним чином:

$$J(P_1, P_2) = \int_{\sigma} I(S) \frac{\exp(ik(R_1 - R_2))}{R_1 R_2} dS.$$

Тут  $R_1$  та  $R_2$  – відстані від довільної точки  $S$  на поверхні джерела до точок спостереження  $P_1$  та  $P_2$ ,  $I(S)$  – поверхнева густина (яскравість) інтенсивності джерела.

Комплексна ступінь когерентності випромінювання відповідно має вид

$$\mu(P_1, P_2) = \frac{1}{\sqrt{I(P_1)}\sqrt{I(P_2)}} \int_{\sigma} I(S) \frac{\exp(ik(R_1 - R_2))}{R_1 R_2} dS,$$

$$I(P_1) = J(P_1, P_1) = \int_{\sigma} \frac{I(S)}{R_1^2} dS, \quad I(P_2) = J(P_2, P_2) = \int_{\sigma} \frac{I(S)}{R_2^2} dS,$$

$$R_{1,2} \approx R + \frac{(x_{1,2} - \xi)^2 + (y_{1,2} - \eta)^2}{2R}, \quad R_1 - R_2 \approx \frac{(x_1^2 + x_2^2) - (y_1^2 + y_2^2)}{2R} - \frac{(x_1 - x_2)\xi + (y_1 - y_2)\eta}{R},$$

де величини  $\xi$  та  $\eta$  означають декартові координати в площині джерела ( $dS = d\xi d\eta$ ).

На основі цього підходу було розраховано ступінь когерентності, що характеризує величину зони когерентності, для квазімонохроматичних джерел круглої форми різних розмірів  $\sigma$  та розподілів інтенсивності  $I(S)$  і, відповідно, визначено вплив часткової когерентності на якість рентгенівського зображення.

#### Список використаних джерел

- [1] D. Paganin, Coherent X-Ray Optics. Oxford Univ. Press, 2013.  
[2] E. Wolf, M. Born, Principles of Optics. Cambridge Univ. Press, 2020.

#### МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМУВАННЯ МІКРОСТРУКТУРИ У СПЛАВАХ Fe-Cr-Al

асп. Лисенко Б. О.; Харченко Д. О., проф., д.ф.-м.н.; Харченко В. О., с.н.с., д.ф.-м.н.  
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

Розроблено модель фазового поля для дослідження динаміки мікроструктурних перетворень та еволюції дефектної структури під час термічної обробки систем Fe-Cr-Al. Досліджено кінетичні та статистичні властивості еволюції мікроструктури та дефектної структури в сплавах з різним вмістом легуючих елементів та при різних температурах відпалу. Проаналізовано вплив легуючих елементів та температури відпалу на механічні властивості сплавів.

У рамках процедури числового моделювання досліджено динаміку формування та росту преципітатів збагаченої на хром  $\alpha'$ -фази, еволюцію їх кількості, середнього розміру, об'ємної частки преципітатів та концентрації хрому в них. Проаналізовано просторове упорядкування точкових дефектів при відпалі. Показано, що на стадії визрівання середній розмір преципітатів та їх кількість еволюціонують за степеневим законом з показниками, що відповідають теорії Ліфшиця-Сльозова-Вагнера. Виявлено, розподіл преципітатів хрому за розмірами залишається універсальним при зміні концентрації легуючих елементів і температури відпалу і задовольняє розподілу Ліфшиця-Сльозова-Вагнера. Досліджуючи кінетику рівноважних точкових дефектів, показано, що під час відпалу твердого розчину вакансії здебільшого рівномірно розподіляються в об'ємі, а міжвузлові атоми здебільшого локалізовані в малих преципітатах  $\alpha'$ -фази і всередині великих виділень поблизу границі поділу фаз з великою кривизною. Показано, що зниження температури, підвищення концентрації хрому та зниження концентрації алюмінію призводять до зростання опору сплаву Fe-Cr-Al до пластичної деформації та зміцнення матеріалу.

## **ПЕРСПЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ З ТАНТАЛУ ДЛЯ УМОВ ЦИКЛІЧНИХ ТЕРМІЧНИХ ТА МЕХАНІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

*Коломієць В.М., к.ф.-м.н.; Кравченко С.М., м.н.с.; Луговський В.О., асп.  
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

Питання створення якісних захисних покриттів на поверхні виробів, що експлуатуються в умовах одночасного впливу високої температури, тиску, агресивного середовища, абразивного зносу й на сьогодні залишається актуальним. Такі покриття повинні відповідати наступним вимогам: бути хімічно стійкими; бути тепловим бар'єром і стійкими до термічної ерозії; протистояти механічному зносу від тертя; мати хорошу адгезію до основного матеріалу виробу; мати коефіцієнт теплового розширення близький до коефіцієнта теплового розширення матеріалу виробу.

Тантал, не дивлячись на те, що є досить дороговартісним серед списку тугоплавких металів, в останнє десятиліття привернув значну увагу в якості матеріалу для захисних покриттів виробів, що працюють в умовах циклічних термічних та механічних навантажень і хімічно активного середовища.

Тантал в масивному стані має об'ємноцентровану кубічну (ОЦК) решітку ( $\alpha$ -Ta) і є досить вогнетривким (температа плавлення  $3017^{\circ}\text{C}$ ), а також має відносно низьку теплопровідність ( $57 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$ ). Крім того, тантал хімічно стійкий, а фаза ОЦК-Ta є досить пластичною, що зменшує ймовірність утворення тріщин і подальшого руйнування покриття при циклічних навантаженнях. Тантал також екологічно чистий та не впливає на здоров'я людини.

Відомо, що покриття Ta можуть бути отримані у двох різних кристалографічних фазах – ОЦК ( $\alpha$ -Ta) та тетрагональній ( $\beta$ -Ta) [1]. Танталові покриття, що містять великий відсоток бета-фази, будуть твердішими, ніж ОЦК покриття, але менш пластичними, і схильними до утворення тріщин внаслідок внутрішніх напружень. Точні механізми, що призводять до утворення покриття з  $\alpha$ -Ta або  $\beta$ -Ta, чітко не визначені, навіть незважаючи на опубліковану велику кількість робіт з цього питання.

В роботі [2] повідомляється, що Ta в  $\alpha$ -фазі можна вирощувати за таких умов осадження: шляхом використання легуючих домішок, таких як  $\text{N}_2$ ; шляхом підтримання температури підкладки під час напilenня вище  $300^{\circ}\text{C}$ ; шляхом відпалу вище  $600^{\circ}\text{C}$ ; шляхом використання підшару, наприклад, ніобію або шляхом подавання потенціалу зміщення на підкладку. Відомо, що ріст покриття, а, отже, і його фізичні властивості контролюються енергією осаджуваних адатомів. До останнього часу енергія осаджуваних адатомів в основному керувалась тільки нагріванням підкладки або іонним бомбардуванням.

При дослідженні умов отримання покриттів Ta авторами роботи [3] D. W. Face та D. E. Prober виявлено, що кристалічну структуру плівок  $\alpha$ -Ta, вирощених на підкладках при кімнатній температурі, можна легко відтворювати та контролювати шляхом нанесенням тонкого ( $> 0.3 \text{ нм}$ ) підшару Nb. Вважається, що Nb є найбільш сприятливим підшаровим матеріалом, оскільки він має таку ж кристалічну структуру, як ОЦК-Ta, і невідповідність решітки складає  $<0,1\%$ .

В останні роки значного розвитку набуває технологія магнетронного розпилення імпульсами високої потужності (HiPIMS). Вказана технологія, за рахунок використання великої пікової потужності (до сотень кіловат) і пікового струму (до сотень ампер) протягом короткого періоду часу, дозволяють отримувати значну концентрацію (до 90%) іонів матеріалу розпилення в плазмі розряду. При цьому середня потужність імпульсів порівняна з величиною потужності магнетронного розпилення постійним струмом DC. Оскільки в плазмі розряду HiPIMS міститься значна кількість іонів матеріалу мішені та робочого газу, то кінетична енергія та поведінка іонів, що бомбардують отримуване покриття, суттєво залежать від величини потенціалу зміщення, прикладеного до підкладки [4].

У роботі [5] вивчався вплив негативної напруги зміщення на щільність іонного струму на підкладку, формування кристалічної фази, зміни мікроструктури та твердості покриттів Та нанесених за допомогою імпульсів високої потужності. Також в цій роботі йде мова про успішне отримання, за допомогою цієї технології, товстих покриттів  $\alpha$ -Та (близько 100 мкм) з високою швидкістю осадження та достатньо щільним покриттям. Негативний потенціал зміщення на підкладку має чітко виражений вплив на фазову структуру покриттів Та і відповідно на їх структурні та фізико-механічні властивості. Як показано в роботі [5] при зміні потенціалу зміщення на підкладку від 0 В до  $-70$  В, кристалічна фаза плівок Та змінювалась із повної бета-фази при напрузі зміщення 0 В, на змішану альфа- та бета-фазу при напрузі зміщення у діапазоні  $-30$  –  $-40$  В і, нарешті, до повної альфа-фази при напрузі зміщення  $-50$  В і більше.

В роботі [6] наведені результати досліджень фізико-механічних властивостей покриттів Та з підшаром Nb (5 мкм) та вказується, що високі показники зносостійкості та стійкості до тріщиноутворення мають покриття з товщиною Та від 20 мкм, які отримані з використанням технології HiPIMS (потенціал зміщення складав близько  $-45$  В).

Таким чином можна узагальнити, що технологія HiPIMS, за рахунок формування висококонцентрованого потоку іонів матеріалу розпилення і керуванні енергією цих іонів шляхом подачі потенціалу зміщення на підкладку, дозволяє отримувати тверді щільні покриття зі зменшеною пористістю та покращеною топологією поверхні. Ця технологія може бути застосована для отримання товстих (близько 100 мкм) корозійностійких та зносостійких покриттів з переважаючою кристалічною фазою  $\alpha$ -Та, а використання підшару Nb дозволяє зменшити вимоги до діапазону параметрів технологічного процесу для отримання ОЦК-Та.

#### Список використаних джерел

- [1] L. Gladczuk, A. Patel, C. Singh Paur та M. Sosnowski, «Tantalum films for protective coatings of steel» *Thin Solid Films*, V. 467, pp. 150-157, 2004.
- [2] K. Valleti, A. Subrahmanyam та S. V. Joshi, «Growth of nano crystalline near  $\alpha$  phase tantalum thin films at room temperature using cylindrical magnetron cathode» *Surface and Coatings Technology*, V. 202, pp. 3325-3331, 2008.
- [3] D. W. Face та D. E. Prober, «Nucleation of body-centered-cubic tantalum films with a thin niobium underlayer» *Journal of Vacuum Science & Technology A*, V. 5, pp. 3408-3411, 1987.
- [4] J. Alami a 1, P. Eklund a, J.M. Andersson a, M. Lattemann a, E. Wallin a, J. Bohlmark a, P. Persson a b, U. Helmersson, «Phase tailoring of Ta thin films by highly ionized pulsed magnetron sputtering» *Thin Solid Films*, V. 515, № 7-8, pp. 3434-3438, 2007.
- [5] J. Lin, J. J. Moore, W. D. Sproul, S. L. Lee та J. Wang, «Effect of Negative Substrate Bias on the Structure and Properties of Ta Coatings Deposited Using Modulated Pulse Power Magnetron Sputtering» *IEEE Transactions on Plasma Science*, V. 38, pp. 3071-3078, 11 2010.
- [6] О. І. Шкурат, В. Т. Ханнолайнен, В. М. Коломієць, С. М. Кравченко, В. М. Канівець, А. М. Юнда та В. І. Костецький, «Магнетронна розпилювальна система для нанесення захисних покриттів на внутрішню поверхню стволів малого калібру» *Озброєння та військова техніка*, Т 27, № 3, сс. 43-49, 2020.

## **ПИТАННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ ЩОДО ПОШИРЕННЯ ЗВУКУ ТА СВІТЛА**

**Лук'янов П.В.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., с.н.с.**

<sup>1</sup> *Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна*

Ніхто не заперечує події, що відбуваються навколо нас і видимі нами. Вони є абсолютними процесами: рух небесних тіл, явища природи відбуваються незалежно від того, знаємо ми про це чи ні. Щойно ми вводимо для вивчення фізичних явищ інерціальні системи відліку, як ми фактично співвідносимо досліджуваний процес із якимось конкретним фізичним тілом, що має властивість інерції. Ми говоримо: рух Землі, Місяця, Сонця в заданій системі координат, тобто співвідносимо цей рух із конкретним об'єктом, тим самим роблячи розглянутий нами рух відносним. А якщо нас цікавить не механічний рух тіл, а рух світла? Виявляється, що принцип відносності, що застосовується у класичній механіці, в інших розділах фізики не однаково реалізується. Для порівняння наведемо використання принципу відносності руху для задач класичної механіки та теорії світла.

Відомо, що в теоретичній і прикладній механіці використовується принцип відносності руху Галілео Галілея. Суть принципу полягає в тому, що в усіх інерціальних системах відліку перебіг механічних явищ і процесів, за однакових початкових умов, відбувається однаково. Альберт Ейнштейн пішов далі і сформулював перший постулат спеціальної теорії відносності [1]: *в інерціальних системах відліку всі закони фізики однакові*. А чи так це насправді? Чи можна використовувати принцип відносності для всіх фізичних явищ?

Справді, після виходу у світ спеціальної теорії відносності, а потім появи загальної теорії відносності А. Ейнштейна, виявилось, що спеціальна теорія відносності вступає в протиріччя із загальною теорією відносності, квантовою механікою. Чому ж це відбувається? Автором даної роботи вивчено статті А. Ейнштейна зі спеціальної теорії відносності, виконано фізичний аналіз постулатів спеціальної теорії відносності, на основі сучасних фізичних знань, знайдено причину суперечливості спеціальної теорії відносності та теорії світла.

У шкільному підручнику фізики, 10 клас [2], наводиться приклад поширення світла в рухомій ракеті. Цей приклад є також і в роботі А. Ейнштейна [1]. І на підставі суджень спеціальної теорії відносності робиться висновок про неодноразовість досягнення світла передньою і задньою частинами рухомої ракети через неодноразовість подій, що відбуваються. І це головний висновок спеціальної теорії відносності. Однак, наведемо кілька прикладів, які просто покажуть несправедливість першого постулату теорії відносності.

*Приклад 1.* Нехай у нас є вагон поїзда, що рухається, рис.1а. Припустимо, що всередині вагона, по центру, після удару по ніжці камертона почала поширюватися звукова хвиля: вліво 1 і вправо 2. Відомо, що звукова хвиля належить до механічних хвиль. Отже, до неї застосовні закони класичної механіки І. Ньютона-Г. Галілея. І ми тут справді можемо говорити про інерціальні системи відліку: звук являє собою поздовжню хвилю, що поширюється в інерціальному середовищі - повітрі. Тому, щойно звук з'явився, він рухається разом із повітрям, яке знаходиться усередині вагона, і вагоном одночасно. А це означає, що передню і задню частину вагона звукова хвиля досягне одночасно.

*Приклад 2.* Тепер припустимо, що джерело звуку, камертон, розташоване в центрі відкритої рухомої платформи, рис.1б. Після удару по ніжці камертона і появи звукової хвилі звукова хвиля поширюватиметься в нерухомому відносно рухомої платформи середовищі, повітрі, і, отже, звукова хвиля раніше досягне задньої частини платформи, ніж передньої: задня частина платформи рухається назустріч звуку, а передня - від нього. Ні про яку неодноразовість перебігу подій мови тут немає, все і так гранично ясно.

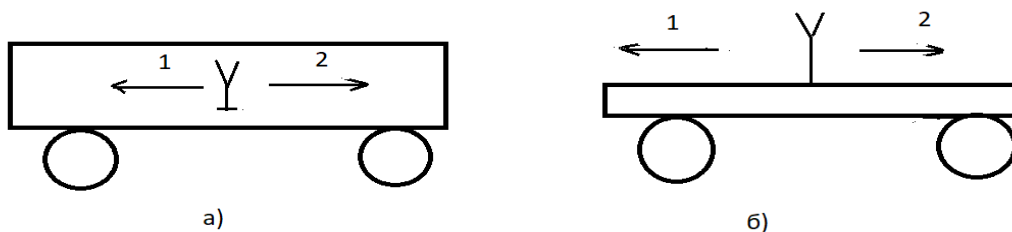


Рис.1 Поширення звуку: а) всередині вагона, б) на відкритій платформі.

*Приклад 3.* Тепер розглянемо космічний корабель, рис.2, рисунок якого наведено в [2]. На рис.2 зображено дві інерціальні системи відліку: нерухома  $OXYZ$  і рухома  $O'X'Y'Z'$ . Припустимо тепер, що в центрі корабля з'явилося джерело світла - запалена свічка або лампочка. І нехай джерело світла продовжує світити (відомо, що світлова хвиля практично миттєво припиняє своє поширення після того, як "вимикається" світло), а космічний корабель рухається. Сьогодні вчені всього світу дійшли згоди, що світло - це і хвильовий, і корпускулярний рух разом узятий. Але на момент написання спеціальної теорії відносності такої чіткої згоди не було, вона з'явилася трохи пізніше. Світло здатне поширюватись у вакуумі. Так от, *питання перше*: чи потрібна інерціальна, тобто механічна система відліку, пов'язана з інерцією того чи іншого середовища для поширення фотонів світла? *Відповідь*: звісно ж ні. У космосі повітря немає, немає сенсу вводити поняття інерції, взагалі: всі тіла перебувають у стані левітації. І, коли світло починає своє поширення у необов'язково інерціальній системі відліку  $OXYZ$  - Всесвіті, воно рухається незалежно від руху космічного корабля: космічний корабель рухається сам собою, а світло в *абсолютному неінерціальному просторі*, Всесвіті, саме по собі. *Світло поширюється неінерціально*. І для нього характер поширення *по суті* подібний до прикладу 2. Тому з тієї ж самої причини, що і звук на відкритій платформі, тобто незалежності руху світла і космічного корабля, фотони світла досягнуть задньої частини космічного корабля раніше, ніж передньої.

*Висновок*: перший постулат теорії відносності не справедливий, тому і спеціальна теорія відносності неправильно пояснює неодночасність перебігу подій і вступає в суперечність із низкою неінерційних фізичних процесів.

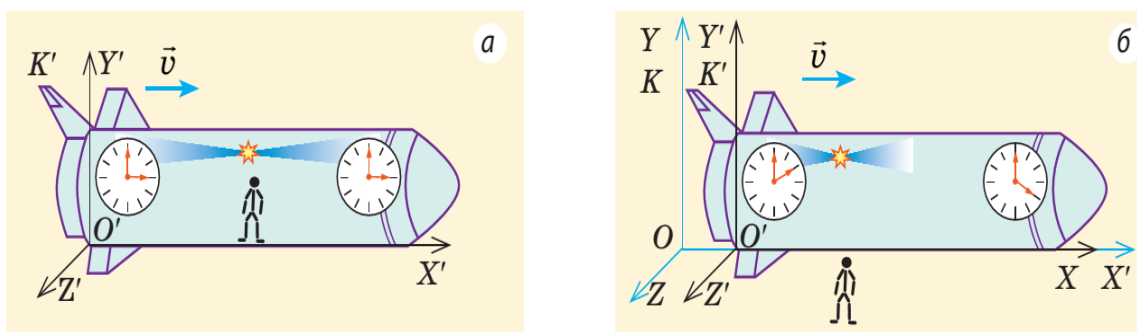


Рис.2 Поширення світла у рухомій ракеті [2]

#### Список використаних джерел

- [1] А.Ейнштейн. Zur electrodynamics der bewegter Körper. Ann.Phys., 1905, vol.17, p.891-921.  
 [2] Фізика 10 клас. За редакцією В.Г. Бар'яхтара, С.О. Довгого. Вид. «Ранок», 2018р, 278с.

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ДЕТЕКТОРУ КАНАЛУ МІКРОЗОНДУ ІПФ НАН УКРАЇНИ

Колінько С.В.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., Магілін Д.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

Одним із аналітичних каналів мікросонду ІПФ є канал характеристичного рентгенівського випромінювання (ХРВ). Принцип роботи цього каналу базується на опроміненні зразка зфокусованим у пляму діаметром 1-5 мкм пучком протонів енергією кілька МеВ та вимірювання отриманого ХРВ. На відміну від гальмівного, ХРВ має лінійчатий спектр якій залежить від виду атомів мішені, що дозволяє визначити елементний склад зразка, а сканування пучком по поверхні зразка робить можливим побудувати карту розподілу елементів. У випадку складного елементного складу через кінцеву роздільну здатність детектора випромінювання вимірний спектр має вигляд багатьох піків, які можуть накладитися один на одного. Для аналізу таких спектрів стає важливою роздільна енергетична здатність детектора.

Досліджуваний кремнієвий детектор XR-100CR X-Ray [1] виробництва фірми АМРТЕК має чутливу площу 25 мм<sup>2</sup>, яка закрита фільтром із берилієвої фольги товщиною 25 мкм. Номінальна роздільна здатність детектора 230 еВ (повна ширина на половині висоти піку). Детектор має вбудований передпідсилювач та двоступінчатий твердотільний охолоджувач.

Для оцінки поточного стану детектору було вирішено виміряти його роздільну здатність. У якості джерела рентгенівського випромінювання використано препарат із америцієм-241. Це є нестабільний ізотоп, при розпаді якого випромінюється альфа-частки, а дочірнє ядро нептунія-237 - конверсійні електрони та каскад гамма-квантів, які і реєструються детектором.

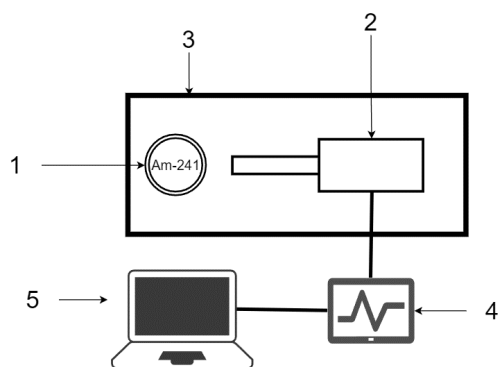


Рис. 1. Структурна схема установки для вимірювання роздільної здатності детектора ХРВ

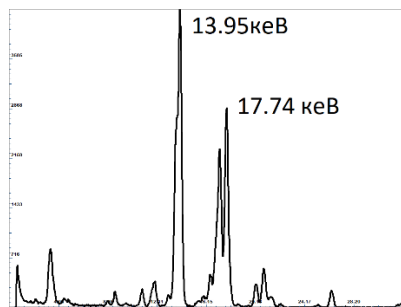


Рис. 2. Вимірний спектр ізотопного джерела Am-241

На рис. 1. Наведено структурну схему установки для вимірювання роздільної здатності детектора ХРВ.

Препарат 1 із ізотопом америція було розміщено поблизу детектора ХРВ 2 у вакуумній камері 3 та виміряно енергетичний спектр гамма-квантів за допомогою аналізатору спектру 4, під'єданого до комп'ютера 5 із програмою «DppMCA Digital Acquisition Software» V1.0.0.023 від АМРТЕК.

Подальший аналіз отриманого спектру (рис. 2) проведено цією ж програмою. Для оцінки роздільної здатності використано апроксимацію піків гаусовим розподілом. Отримані значення роздільної здатності на рівні 280-300 еВ, що на 30% гірше за номінальне значення.

### Список використаних джерел

- [1] <https://www.amptek.com/products/x-ray-detectors/sipin-x-ray-detectors/sipin-x-ray-detectors>

## **ДЕЯКІ АСПЕКТИ МЕТОДИКИ НАВЧАННЯ ФІЗИКИ СТУДЕНТІВ БІОТЕХНОЛОГІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ**

**Маринченко Л.В.<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с.; Ніжельська О.І.<sup>2</sup>, к.б.н.**

<sup>1</sup> Факультет біотехнології і біотехніки, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 37, Берестейський проспект, Київ-03056, Україна

<sup>2</sup> Лабораторія 36 композитних матеріалів атомно-водневої енергетики, Інститут прикладної фізики НАНУ (Суми), проспект Науки, 46, Київ - 03028, Україна

Незважаючи на бурхливий розвиток інформаційних та біотехнологій, фізика залишається необхідним фундаментом для розуміння та застосування прикладних програм для навчання та досліджень. З огляду на ускладнення методів, прийомів і апаратного оформлення засобів вивчення біологічних об'єктів та розробки нових технологій і лікарських засобів, в основі яких лежать біофізичні методи та розрахунки, методики зацікавлення студентів-біотехнологів фізикою у закладах вищої освіти залишається актуальним. В основі таких методів, однак, лежить «нудна» і складна фізична теорія, без опанування якої неможливо викладачу пояснити, а студенту усвідомити принципи роботи приладів і методик досліджень.

Слід пам'ятати, що в умовах реформування вищої освіти студенти мають змогу самі обирати траєкторію навчання та дисципліни, які їх більше цікавлять. Тривалий карантин, коли було впроваджено викладання онлайн, а потім небезпека, пов'язана з перебуванням великої кількості здобувачів вищої освіти в університеті під час повітряних атак підступного ворога, спустошив аудиторії та лабораторії від студентів. Водночас, досвід викладання біотехнологічних дисциплін та методів аналізу в біотехнології показав, що молодь прагне оволодіти практичними навичками та досвіду «роботи руками». Тому перевагу у виборі дисциплін студенти надають тим курсам, в програмі яких передбачено лабораторні та практичні роботи. Особливе зацікавлення викликає можливість працювати із застосуванням сучасних методів та обладнання.

Однак, з матеріальною базою закладів вищої освіти теж, на жаль, є проблеми. Навіть, якщо студенти повертаються в лабораторії, застаріле обладнання та тривалий безповірковий період не дають змоги зняти покази та отримати релевантні результати, які б продемонстрували фізичні закони на мікро- та молекулярному рівні.

Наприклад, наші студенти мали змогу досліджувати поверхню біологічних об'єктів на навчальному приладі Nanoeducator, вивчаючи метод атомно-силової та магнітно-силової мікроскопії (АСМ і МСМ). Потім ці зображення обробляли за допомогою графічної програми Gwyddion.

Наразі за відсутності обслуговування та заміни зондів робота на цьому приладі неможлива. Однак, залишились експериментальні дані – зображення, отримані в попередні роки на цьому та інших приладах. Адже, отримання досвіду обробки реальних експериментальних даних є важливим елементом навчання студентів.

Одним із варіантів практичного досвіду та вдосконалення навичок обробки зображень є аналіз АСМ та МСМ зображень біологічних об'єктів, отриманих на скануючому зондовому мікроскопі Solver Pro-M у пакеті Nova 1.026. Це – зображення мічених наномігнетитом дріжджових клітин, як сорбентів важких металів, зображення ракових клітин, чутливих та нечутливих до цитостатиків.

В той же час, використання для навчання цифрових зображень з інтернету або вже опублікованих даних може викликати суперечки з авторським правом, на підставі чого ця частина роботи може бути визнана плагіатом.

Тому ми пропонуємо навчати студентів на реальних цифрових мікрозображеннях, з відомими умовами, за різного збільшення, які ще не були проаналізовані та оброблені за допомогою пакетів прикладних комп'ютерних програм.

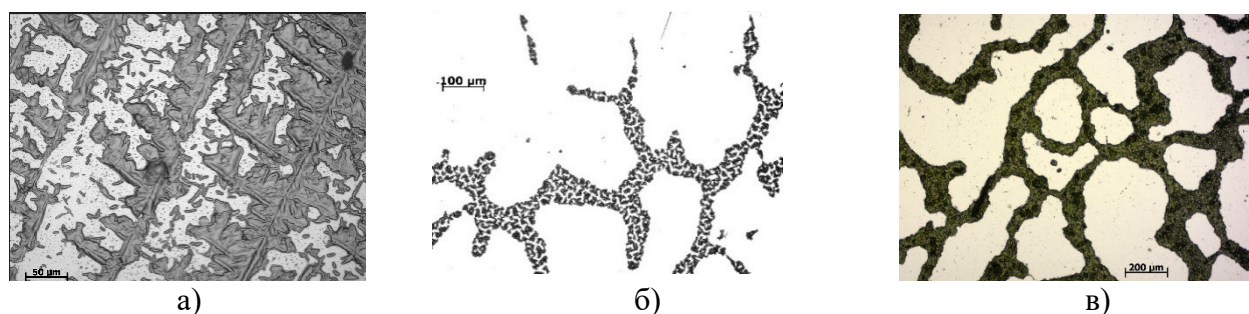


Рис.1. Мікрозображення висохлих в магнітному полі: а) клітин лактобацил із залишками середовища; б) дріжджових клітин; в) клітин мікроводоростей

Зокрема, дуже корисними можуть бути навички обчислення фрактальної розмірності, як фізичного параметру, реальних біологічних структур, утворених клітинами мікроорганізмів або раковими клітинами, адже не всі зображення було використано для опублікування. Наприклад, за впливу магнітного поля протягом висихання краплі середовища з пробіотичними бактеріями на поверхні кремнієвої пластинки утворюються ефектні дендритні структури (рис.1а). А клітини дріжджів (рис.1б) або рухливих одноклітинних водоростей (рис.1в) утворюють упорядковані фігури, як дещо нагадують комірки Бенара.

На прикладі таких зображень студенти можуть зацікавитись фізичними причинами, що зумовили такий розподіл клітин та залишків середовища на плоских поверхнях за впливу фізичних факторів. Адже дослідницький інтерес і виникає внаслідок незвичайних ефектів, які потребують пояснення.

Цифрові зображення студенти можуть обробити за допомогою програми ImageJ, в якій за допомогою плагіна FracLac обчислюється фрактальна розмірність і лакунарність. На таких прикладах студенти можуть зрозуміти відмінність між математичними (ідеальними) та фізичними (реальними) фрактальними структурами, виділяти типові характеристики об'єкта і випадкові включення, самостійно проводити аналіз від візуального спостереження картини до числової оцінки.

Іншим прикладом розвитку природного інтересу студентів-біотехнологів до вивчення структур молекул біологічно активних речовин є побудова (візуалізація) таких молекул в комп'ютерних програмах, які доступні онлайн. Такі прикладні програми містять модулі для квантово-хімічної мінімізації енергії системи і дають змогу оптимізувати геометрію системи, прогнозувати поверхню, що доступна розчиннику, наявність гідрофільних/гідрофобних ділянок молекули, розраховувати заряди на атомах та показувати розподіл електростатичного потенціалу. Це, в свою чергу, дає змогу оцінити здатність молекули електростатично взаємодіяти із зарядженими поверхнями, зокрема й клітинами. Цікавими є програми, які дають змогу моделювати молекулярний докінг – можливість взаємодії, наприклад, між лігандом і активним центром ферменту. Таке прогнозування *in silico* реально спрощує дослідникам пошук можливих молекул-кандидатів ліків, а студентам дає уявлення про такі поняття, як ван-дер-ваальсові сили взаємодій між атомами, ентальпія утворення молекули, дипольний момент, розподіл зарядів на атомах, електростатичний потенціал та ін.

Таким чином, навіть в умовах онлайн навчання та тимчасової недоступності для студентів-біотехнологів дослідницьких лабораторій, є можливість навчитися обробляти та аналізувати реальні експериментальні мікрозображення, впроваджувати вміння прогнозувати міжмолекулярні взаємодії біологічно активних речовин, вивчаючи фізичну основу молекулярної біофізики. Оскільки завдання можна обирати серед оригінальних даних, а не навчальних прикладів, то результати можна презентувати як самостійну працю студента.

## ВПЛИВ ДОВЖИНИ НІЖКИ ІМПЛАНТА НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАННИЙ СТАН СИСТЕМИ «КІСТКА-РЕВІЗІЙНИЙ ІМПЛАНТ»

Моргун О.І., студент; Черемшук Р.В., студент; Мусієнко О.С., PhD, ст. викладач  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

Ендопротезування являється ключовим методом відновлення функцій кінцівок у випадках важких поранень. Проте, проєктування та виготовлення імплантів для цього процесу залишаються нагальною проблемою, особливо у зв'язку із зростанням числа пацієнтів з масивними дефектами суглобів та відсутністю національного виробництва з врахуванням індивідуалізованих характеристик пацієнта [1].

Завданням даного дослідження є проведення аналізу та оцінка напружено-деформованого стану кісток при різних довжинах ніжок імплантів.

Початковим етапом є створення моделі двошарової кістки та моделі імпланту [2]. Після чого було створено збірку «кістка-протез» (рис. 1) для подальших обрахунків та дослідженні напружено-деформованого стану.

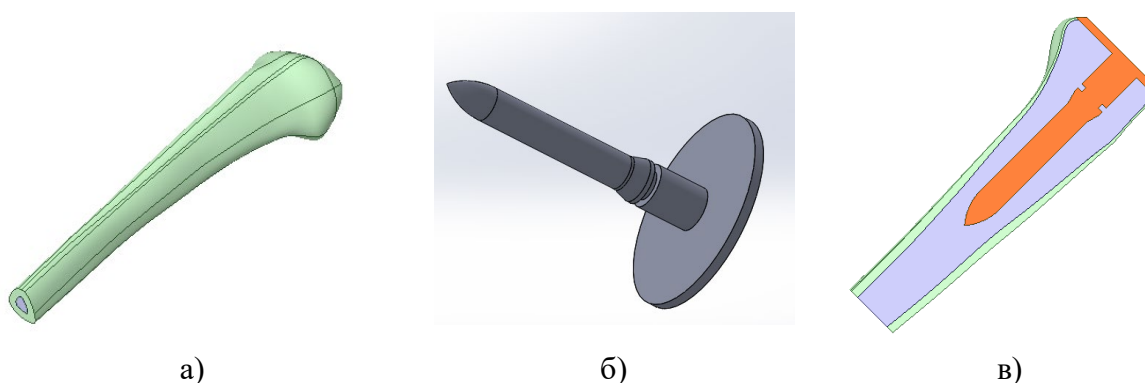


Рис. 1. Геометрична модель: а) великогомілкової кістки; б) ревізійного колінного протезу; в) системи «кістка-протез» в розрізі

Наступним кроком є створення чисельної моделі системи [3]. Для розв'язання задачі методом скінченних елементів, необхідно дискретизувати геометричну модель. Отже, було отримано дискретні моделі з кількістю вузлів  $\approx 2,5 \cdot 10^6$  та кількістю скінченних елементів  $\approx 1,6 \cdot 10^6$ . Вигляд скінченно-елементної сітки зображено на рис. 2 а). Для подальшої роботи необхідно задати крайові умови на систему, а саме зусилля та способи закріплення. В даному випадку нижні грані кортикальної та губчастої кісткових тканин жорстко закріплені, а на верхню грань протеза прикладено вертикальне зусилля величиною 750 Н (рис. 2 б)), що імітує вагу середньостатистичної людини.

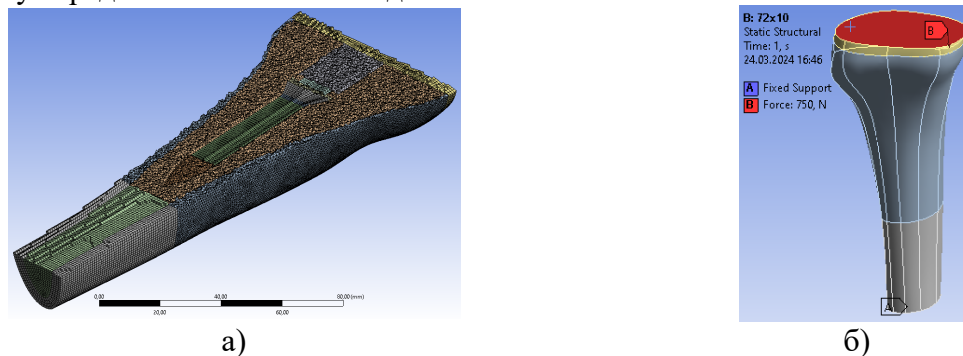


Рис. 2. Чисельна модель: а) сітка скінченних елементів системи «кістка-протез» у розрізі; б) крайові умови.

Було проведено низку чисельних експериментів, де варіювалася довжина ніжки протезу. Визначено розподіл напружень системи «кістка-протез».

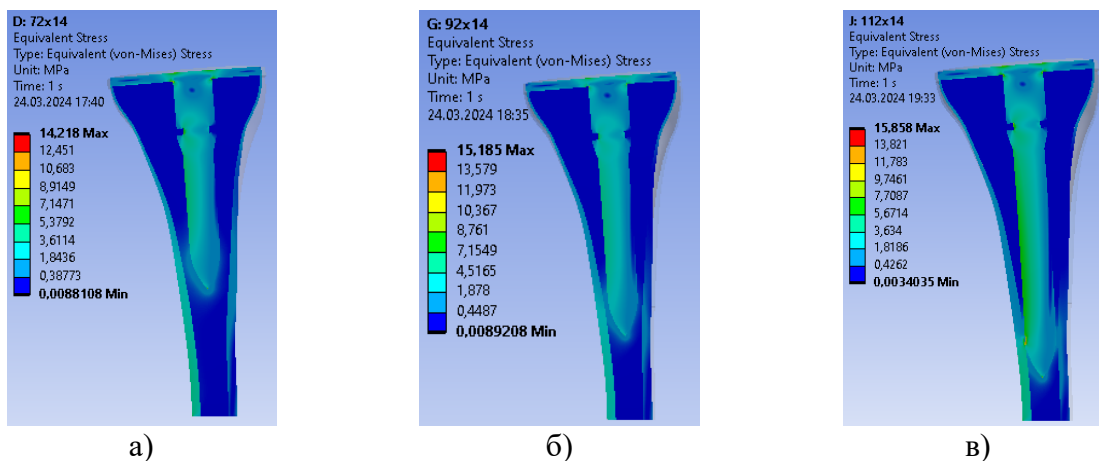


Рис. 3. Розподіл напружень системи з діаметром ніжки 14 мм і довжиною: а) 72 мм; б) 92 мм; в) 112 мм

З рисунку видно, що найбільші напруження виникають у протезі, а найменші – у губчастій кістковій тканині. Проте напруження в протезі є значно меншими за межу міцності титанового сплаву, тому в цій роботі вони не розглядаються.

Отже, можна зробити висновок, що довжина ніжки протеза впливає на напруження, що виникають в кістковій тканині. Зі збільшенням довжини ніжки збільшується напруження в кістці в околі кінця ніжки. Результати цих досліджень можна використовувати в подальшому для створення ревізійних колінних ендопротезів.

#### Список використаних джерел

- [1] Малоінвазивні технології при лікуванні внутрішньо суглобових переломів в ділянці колінного суглоба, Бур'янов О.А., Кваша В.П., Соболевський Ю.Л., Скобенко Є.О
- [2] H.Y. Tan, K.S. Basaruddin, M.H. Mat Som, S.F. Khan, A.R. Sulaiman and A. Shukrimi, Finite Element Analysis of Tibia with Osteogenesis Imperfecta: The Influence of Considering Cancellous Bone in Model Reconstruction, International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS Vol:19 No:04, 2019, 137-142
- [3] Duc Quan Pham, Olha Musiienko, Oleksii Morhun, Roman Didenko. Development of a finite element model for optimization of the bone fixator design 27th International Conference on Fracture and Structural Integrity, IGF27 February 21-24, 2023, Rome (Italy) & Web <https://doi.org/10.53255/IGFTUBE.IGF27.4>

### НАБЛИЖЕННЯ ДЛЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ЕЛІПТИЧНИХ ФУНКЦІЙ У СТАНДАРТНІЙ ТЕОРІЇ ТУНЕЛЮВАННЯ ФАУЛЕРА-НОРДГЕЙМА ДЛЯ БАР'ЄРА ШОТТКІ-НОРДГЕЙМА

Мусяєнко І.І., м.н.с.

Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

Формулу для густини струму  $j_1$  польової емісії з металу, враховуючи вплив сили дзеркального зображення на форму потенціального бар'єра біля поверхні металу, знайдено Фаулером Р.Г. і Нордгеймом Л.В. і представлено в [1,2,3,4] у формі:

$$j_1 = A(eE_0)^2 \exp\left(-\frac{B}{eE_0}v(y_F)\right), \quad (1)$$

де  $A = \frac{e}{16\pi^2\hbar\chi t^2(y_F)}$ ;  $B = \frac{4k}{3}\chi^{\frac{3}{2}}$ ;  $e$  – заряд електрона;  $E_0$  – напруженість постійного електричного поля;  $\chi$  – робота виходу;  $k = \sqrt{2m}/\hbar$ ;  $m$  – маса електрона;  $\hbar$  – зведена стала

Планка;  $v(y_F)$  – функція Нордгейма;  $y_F = \sqrt{\frac{e^3}{4\pi\epsilon_0}} \cdot \frac{\sqrt{E}}{\chi}$ . Підставляючи значення констант і вимірюючи  $j_1$  в А/м<sup>2</sup>,  $E_0$  в В/м,  $\chi$  в еВ, аргумент  $y_F$  еліптичних функцій  $t(y_F)$  і  $v(y_F)$  у вибраних основних і похідних одиницях вимірювання Міжнародної системи одиниць (SI)

видозмінюється у форму  $\left[ \sqrt{\frac{e^3}{4\pi\epsilon_0}} \right] = \sqrt{\frac{e_0}{4\pi\epsilon_x}} \text{ еВ} \cdot B^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{\mathcal{M}}$ , де безрозмірні величини

$$e_0 = 1,6021766 \cdot 10^{-19}, \quad \epsilon_x = 8,8541878 \cdot 10^{-12}, \quad \sqrt{\frac{e_0}{4\pi\epsilon_x}} = 3,7946864 \cdot 10^{-5}. \quad \text{Тобто}$$

$$y_F = 3,794686 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{\sqrt{E}}{\chi}.$$

Функції Нордгейма записано в [4] у формі:

$$v(y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \sqrt{1 - y^2}} \left( E(k_y) - \left(1 - \sqrt{1 - y^2}\right) K(k_y) \right), \quad (2)$$

$$t(y) = v(y) - \left( \frac{2y}{3} \right) \left( \frac{dv(y)}{dy} \right), \quad (3)$$

де  $y = \sqrt{\frac{e^3}{4\pi\epsilon_0}} \cdot \frac{\sqrt{E_0}}{C - W}$ ;  $y(\mu) = y_F$ ,  $E(k_y)$ ,  $K(k_y)$  – повні еліптичні інтеграли другого і першого

роду відповідно;  $k_y^2 = \frac{2\sqrt{1 - y^2}}{1 + \sqrt{1 - y^2}}$ ;  $C = \mu + \chi$ ;  $\mu$  – електрохімічний потенціал;  $W$  – компонента

енергії, що відповідає руху електрона за нормаллю до поверхні металу. У статті [2] наближення для спеціальних еліптичних функцій представлено аналітичними виразами:

$$\begin{aligned} v(y_F) &\approx 1 - y_F^2 + (1/3)y_F^2 \ln(y_F), \\ t(y_F) &\approx 1 + (1/9)(y_F^2 - y_F^2 \ln(y_F)). \end{aligned} \quad (4)$$

Порівняння розглянутих величин показані графічно на рис. 1, які побудовані за умов:  $\chi = 4,5$  еВ,  $\mu = 7,5$  еВ, температури  $T = 0$  К. На рис. 1 криві, зображені точками, побудовані за допомогою підстановки у формулу (1) наближень (4) для спеціальних еліптичних функцій. Суцільними і штриховими кривими позначено графічні залежності, отримані методом чисельних обчислень функцій (2) і (3). Позначення  $j_{F-N}$  означає модельну густину струму без врахування впливу сили дзеркального зображення на форму потенціального бар'єра.

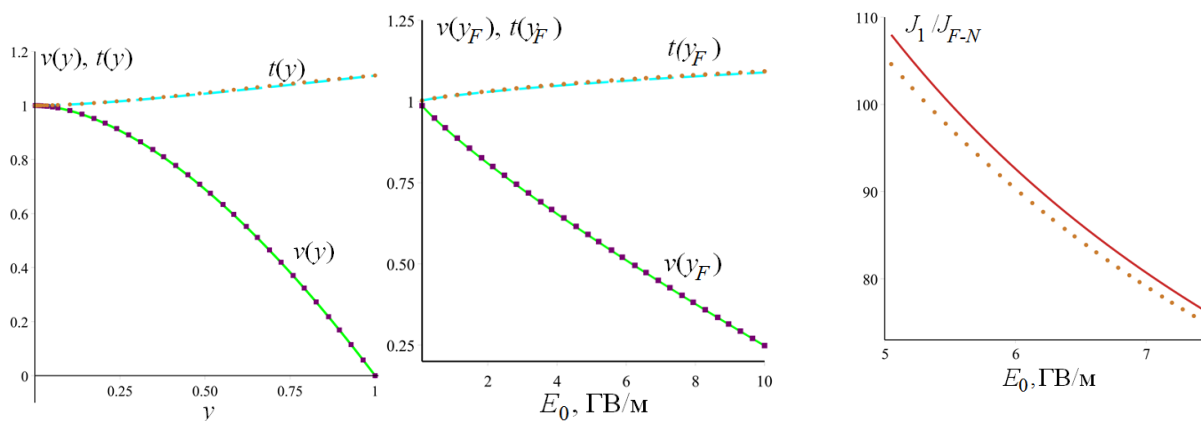


Рис. 1. Графіки залежностей функцій Нордгейма  $v(y)$ ,  $t(y)$  і  $j_1/j_{F-N}$  від напруженості  $E_0$

### Список використаних джерел

- [1] N. Egorov, E. Sheshin, *Field Emission Electronics*. New York, U.S.A.: Springer Series in Advanced Microelectronics, 2017.
- [2] R.G. Forbes, "Simple good approximations for the special elliptic functions in standard Fowler-Nordheim tunneling theory for a Schottky-Nordheim Barrier", *Applied Physics Letters*, vol. 89, pp. 113122-1-113122-3, 2006.
- [3] R.G. Forbes, "The Murphy-Good plot: a better method of analysing field emission data", *Royal Society Open Science*, vol. 6, no. 190912, pp. 1-13, 2019.
- [4] E.L. Murphy, R.H. Good, "Thermionic emission, field emission, and the transition region", *Physical Review*, vol. 102, no. 6, pp. 1464-1473, 1956.

## ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ЕФЕКТИ В ПРОЦЕСІ НАРОДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЇ ПАРИ ФОТОНОМ В ПОЛІ ЛАЗЕРНОЇ ХВИЛІ

Недорешта В.М., к.ф.-м.н., н.с.

Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

Теоретично враховано вплив поляризаційних ефектів на процес народження електрон-позитронної пари фотоном у полі лазерної хвилі. Детально вивчено кінематичні характеристики процесу, отримано амплітуду та ймовірність. Було виявлено, що ймовірність процесу чутлива до поляризації зовнішньої хвилі та гамма-кванту.

Процес народження електрон-позитронної пари фотоном у полі світлової хвилі досліджується давно (див., наприклад, [1,2]). У цій роботі, на відміну від попередніх, отримано ймовірність процесу народження електрон-позитронної пари у полі лазерної хвилі еліптичної поляризації. Використовується модель монохроматичного електромагнітного поля, що розповсюджується вздовж осі  $z$ , чотири-потенціал якого має вигляд:

$$A(\varphi) = \frac{F}{\omega} [\varepsilon_x \cos \varphi + \delta \varepsilon_y \sin \varphi], \quad \varphi = \kappa x = \omega(t - z). \quad (1)$$

Тут  $\delta$  – параметр еліптичності,  $\kappa = (\omega, \mathbf{\kappa})$  і  $\varepsilon_{x,y} = (0, \varepsilon_{x,y})$ ,  $\varepsilon_{x,y}^2 = -1$  – 4-імпульс та поляризаційні 4-вектори хвилі. Назустріч хвилі під заданим малим кутом спрямований гамма-квант із заданою частотою  $\omega$  (див. рис.1). Кут віддачі  $\phi$ , під яким вилітає позитрон щодо гамма-кванту можна записати у вигляді:

$$\cos \phi = \cos \vartheta_p \cos \vartheta' + \sin \vartheta_p \sin \vartheta' \cos(\varphi_p - \varphi'). \quad (2)$$

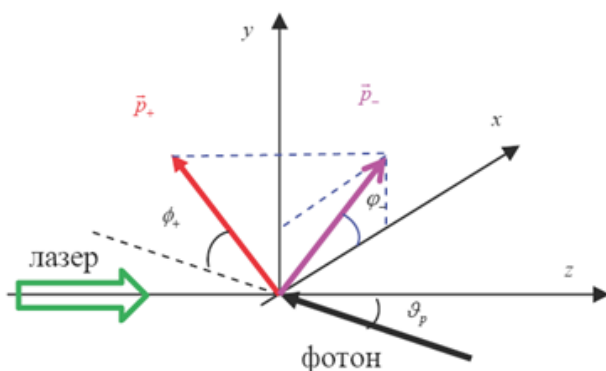


Рис. 1. Геометрія процесу.

Розв'язання задачі зводиться до того, що залишається тільки дві незалежні змінні, якими ми обираємо кути вильоту позитрона  $\vartheta_+$ ,  $\varphi_+$ . Всі інші величини в кінцевому підсумку виражаються через них і початкові параметри.

Процес розглядається для частинок з високими енергіями, коли основним параметром є класичний реляти-вістськи-інваріантний параметр  $\eta = (|e| F \lambda) / (mc^2) \gtrsim 1$ , який чисельно

дорівнює відношенню роботи поля на довжині хвилі до енергії спокою електрона ( $e$  і  $m$  –

заряд і маса електрона,  $F$  і  $\lambda = c/\omega$  – напруженість і довжина хвилі електричного поля). Будемо використовувати релятивістську систему одиниць:  $\hbar = c = 1$ .

Досліджуваний процес є суперпозицією процесів у формі  $\gamma(k) + l\gamma_L(\kappa) \rightarrow e^-(q_-) + e^+(q_+)$ , де гамма-квант взаємодіє з довільною кількістю  $l$  лазерних фотонів  $\gamma_L$  з енергією  $\omega$  перед народженням електрон-позитронної пари.

Слід підкреслити, що у вакуумі протікання даного процесу заборонено, оскільки закон збереження чотири-імпульсів не виконується. Проте всередині поля плоскохвильового лазера можуть поглинатися додаткові лазерні фотони і процес вимушеного народження пари вхідним фотоном стане можливим. Число  $l$  можна інтерпретувати як число фотонів, поглинутих із поля хвилі. Кількість фотонів має перевищувати порогове значення  $l_0$ :

$$l > l_0 = \frac{2m^2(1+\eta^2)}{\kappa k}. \quad (3)$$

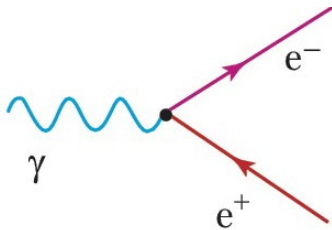


Рис. 2. Діаграма Фейнмана для процесу народження електрон-позитронної пари фотоном у полі електромагнітної хвилі.

Діаграма Фейнмана для народження пари електрона та позитрона з чотири-імпульсами  $q_- = (q_{0-}, \mathbf{q}_-)$  та  $q_+ = (q_{0+}, \mathbf{q}_+)$  відповідно фотоном з чотири-імпульсом  $k = (\omega, \mathbf{k})$  показана на рис. 2. Слід зазначити, що у зовнішньому полі лазерної хвилі основну роль грає не 4-імпульс частинки  $p$ , а 4-квазіімпульс:

$$q = p + \frac{1}{4}(1+\delta^2)\eta^2 \frac{m^2}{(\kappa p)} \kappa. \quad (4)$$

Тобто з'являється добавка, середня за періодом хвилі. Вона має квадратичну залежність від параметра  $\eta$ , а також залежить від еліптичності лазера  $\delta$ .

Амплітуду процесу отримано у вигляді суми. Кожному парціальному процесу відповідає процес взаємодії гамма-кванта з  $|l|$  фотонами зовнішньої хвилі:

$$S_{pair} = \sum_{l=-\infty}^{\infty} S_l, \quad S_l = \frac{-ie(2\pi)^4 e^{-id_{p-p_+}}}{2\sqrt{2q_{0+}q_{0-}}\omega V^3} (\bar{u}_{p_-} G_{-l}^v v_{-p_+}) \delta^{(4)}(q_+ + q_- - k - l\kappa). \quad (5)$$

До виразу (5) входять 4 дельта-функції, аргументами яких є відповідні компоненти 4-імпульсів взаємодіючих частинок. Функція  $G_{-l}^v$  має громіздкий вигляд і представляється як лінійна комбінація функцій Бесселя, аргументи яких залежать від імпульсно-просторових характеристик лептонів, фотонів та зовнішнього поля.

Для аналізу представляє інтерес диференціальна ймовірність переходу у фазовий об'єм.

$$dw_{i \rightarrow f} = |S_{pair}|^2 \frac{Vd^3 p_-}{(2\pi)^3} \frac{Vd^3 p_+}{(2\pi)^3}. \quad (6)$$

Після стандартних процедур [1] вираз (6) для диференціальної ймовірності можна представити у вигляді суми парціальних ймовірностей:

$$\frac{1}{T} \frac{dW}{d\Omega_+} = \sum_T \Xi \frac{N^2 V^3 E_+ E_-^2}{(2\pi)^2 [l(\kappa n_+) - (kn_+)]}, \quad E^+ = \frac{l(\kappa k)}{\omega_0 + l\omega - \mathbf{k}\mathbf{n}_+ - l\kappa\mathbf{n}_+}, \quad (7)$$

$$2\Xi = (W_1 + W_2) + \xi_1 (W_{\pi/4} - W_{-\pi/4}) + \xi_2 (W_+ - W_-) + \xi_3 (W_1 - W_2), \quad (8)$$

де  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  – параметри Стокса, що характеризують гамма-квант. Функції  $W_1, W_2$  представляють собою випадок лінійної поляризації фотона вздовж осі  $x$  та у відповідно, а

$W_{\pm\pi/4}$ ,  $W_{\pm}$  – випадки лінійної поляризації під кутом  $\pm\pi/4$  та правої і лівої кругової поляризації фотона. Для еліптичної поляризації зовнішньої хвилі вони мають громіздкий вигляд.

Аналіз показав, що ймовірність народження електрон-позитронної пари фотоном у полі лазерної хвилі чутлива до поляризації зовнішньої хвилі та гамма-кванту.

#### Список використаних джерел

- [1] A.I. Nikishov, V.I. Ritus, Quantum processes in the field of a plane electromagnetic wave and in a constant field, Sov. Phys. JETP, 83.149.229.155, 1964.  
[2] N.B. Narozhnyi, M.S. Fofanov, Creation of a pair by a photon colliding with a short focused laser pulse, Laser Physics, vol. 7(1), pp. 141-149, 1997.

### НЕДИПОЛЬНІ ЕФЕКТИ ПРИ ЗБУДЖЕННІ ВАЖКОГО ВОДНЕПОДІБНОГО ІОНУ ЛАЗЕРНИМ ІМПУЛЬСОМ

*Новак О. П., к.ф.-м.н., с.н.с.; Дяченко М.М., к.ф.-м.н.,  
Холодов Р.І., д.ф.-м.н., чл.кор. НАН України  
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

Успіхи лазерної техніки дозволяють створювати так звані структуровані пучки світла, в яких просторові та часові розподіли амплітуди, фази та поляризації можуть бути сформовані довільним чином [1]. Відомим прикладом структурованого світла є пучки з орбітальним кутовим моментом, в яких фазова поверхня має вигляд спіралі. Такі пучки викликають значний інтерес в атомній фізиці [2-4]. Наприклад, в [1] показане збудження недипольних переходів в іонах. Відносно малий ефект Штарка відкриває можливості для підвищення точності атомних годинників. Значний інтерес також викликають короткі лазерні імпульси тривалістю кілька оптичних періодів, які надають можливості дослідження швидких атомних процесів. При дослідженні взаємодії випромінювання з речовиною, зокрема з іонами в пастках, часто використовується модель плоскої хвилі та дипольне наближення. Однак, в пучках структурованого світла істотну роль відіграє просторова залежність поля, тому важливо врахувати як імпульсний характер поля, так і вклад недипольних ефектів.

В даній роботі теоретично досліджено процес збудження електрону воднеподібного іону з основного стану на L-оболонку під дією короткого лазерного імпульсу з урахуванням релятивістських та недипольних ефектів. Векторний потенціал імпульсу задано як

$$\vec{A}(\eta) = \frac{E_0}{\omega} \sin^2 \left( \frac{\eta\pi}{\omega T_p} \right) \left[ \vec{e}_x \cos \eta + \delta \vec{e}_y \sin \eta \right], \quad (0.1)$$

де  $\eta = \omega t + kz$  – фаза електромагнітної хвилі,  $\vec{e}_x$  і  $\vec{e}_y$  – вектори поляризації,  $\delta$  – параметр еліптичності хвилі.

В релятивістській теорії збурень амплітуда переходу має вигляд

$$a_{fi} = -ie \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(\mathcal{E}_f - \mathcal{E}_i)t} \langle \Phi_f | \vec{\alpha} \vec{A}(\eta) | \Phi_i \rangle dt. \quad (0.2)$$

Тут  $\alpha$  – матриці Дірака,  $i, f$  – колективні індекси початкового та кінцевого станів. В якості хвильових функцій  $\Phi(r, \theta, \phi)$ , що описують стан електрону, обрано розв'язки рівняння Дірака для електрона в полі точкового ядра,  $\mathcal{E}_i$ ,  $\mathcal{E}_f$  – відповідні енергії рівнів.

Амплітуда має вигляд чотирикратного інтегралу, а залежність потенціалу від фази не дозволяє факторизувати її на інтеграли по часу  $t$ , радіальній координаті  $r$ , та тілесному куту  $\Omega$ . Для факторизації амплітуди та обчислення імовірності було використано наступну

методику. Спочатку векторний потенціал записано у вигляді в ряд Фур'є. Кожний множник виду  $e^{\pm ikz}$  було представлено як суму радіальних хвиль за допомогою формули Релея [5]. Тоді амплітуда має вигляд

$$a(\chi_f, \mu_f) = eA_0 \sqrt{6} \sum_{qv\lambda} \sqrt{2\lambda+1} f_v \left[ i^\lambda P_q I_-(\omega_v) + (-i)^\lambda S_q I_+(\omega_v) \right] \times \\ \times \left[ R(f, i; \lambda; k_v) M(\chi_f, -\chi_i; \mu_f, \mu_i; q, \lambda) - R(i, f; \lambda; k_v) M(-\chi_f, \chi_i; \mu_f, \mu_i; q, \lambda) \right] \quad (0.3)$$

Тут  $P^q, S^q$  – компоненти постійних векторів в циклічному базисі ( $q = \pm 1$ ), які задають поляризацію лазерного імпульсу,  $f_v$  та  $k_v$  – коефіцієнти Фур'є та відповідні хвильові вектори, індекс  $\lambda$  визначає порядок мультипольної поправки;  $\chi$  –спін-орбітальне квантове число,  $\mu$  – проекція повного кутового моменту;  $I_\pm(\omega_v)$  – інтеграли по часу,  $R(f, i; \lambda; k_v)$  – радіальна частина,  $M(-\chi_f, \chi_i; \mu_f, \mu_i; q, \lambda)$  – інтеграли по кутовим змінним.

Всі інтеграли у виразі (1.3) відомі в явному вигляді. Зокрема, величини  $M$  визначають правила відбору для переходів. Дозволені такі переходи з K- на L-оболонку:

$$\begin{cases} 1S_{1/2} \rightarrow 2P_{1/2} \\ 1S_{1/2} \rightarrow 2P_{3/2} \end{cases} \quad \text{для } \lambda = 0, 2; \quad 1S_{1/2} \rightarrow 2S_{1/2} \quad \text{для } \lambda = 1, \quad (0.4)$$

$$\mu_f = \mu_i \pm 1 \quad (0.5)$$

На рис.1 зображено залежність імовірності переходів  $1S_{1/2} \rightarrow 2P_{3/2}$  та  $1S_{1/2} \rightarrow 2S_{1/2}$  як функції параметру еліптичності та частоти в одиницях  $\omega' = 2(1 - \epsilon_0)$  для різних значень заряду ядра. Напруженість поля дорівнює  $E = 10^{-2} E'$ , де  $E' = 3Z / \langle r^2 \rangle$  – напруженість кулонівського поля ядра на першій борівській орбіті. Тривалість лазерного імпульсу – п'ять оптичних періодів. Як бачимо, імовірність переходів має складну структуру і значно пригнічена для деяких комбінацій частоти та поляризації імпульсу. Частоти та поляризація, для яких спостерігається пригнічення переходів, залежать від заряду ядра.

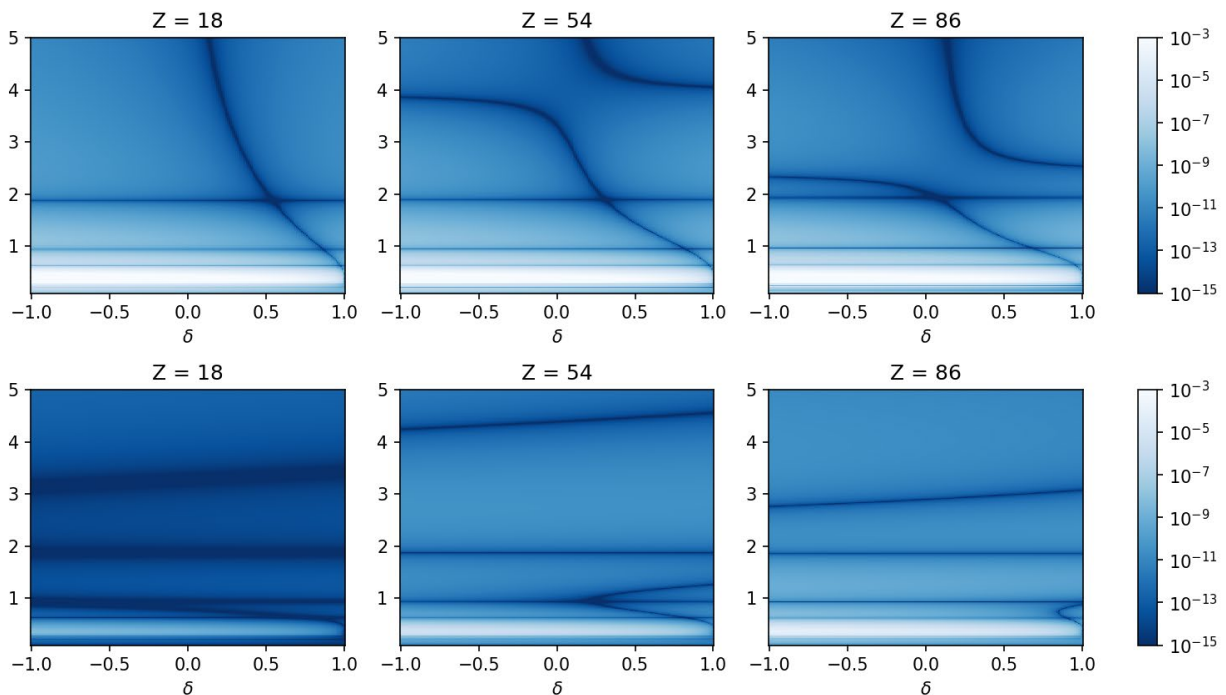


Рис. 1. Залежність імовірності збудження електрону воднеподібного іона з K- на L-оболонку в залежності від поляризації  $\delta$  (по горизонталі) та відносної частоти  $\omega/\omega'$  (по вертикалі). Верхній ряд: найбільш імовірний канал  $1S_{1/2} \rightarrow 2P_{3/2}$ ; нижній ряд: магнітодипльний перехід  $1S_{1/2} \rightarrow 2S_{1/2}$ .

### Список використаних джерел

- [1] Chao He, Yijie Shen, and Andrew Forbes. "Towards higher-dimensional structured light". *Light: Science & Applications*, vol.11, 205, 2022.
- [2] C.T. Schmiegelow et al. "Transfer of optical orbital angular momentum to a bound electron". *Nature Communications*, vol.7, 12998, 2016.
- [3] H. M. Scholz-Marggraf et al, "Absorption of twisted light by hydrogenlike atoms". *Phys. Rev. A*, vol.90, 013425, 2014.
- [4] S. A.-L. Schulz et al, "Generalized excitation of atomic multipole transitions by twisted light modes". *Phys. Rev. A*, vol.102, 012812, 2020.
- [5] W. R. Johnson. *Atomic Structure Theory*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.

## ЗАСТОСУВАННЯ РЕНТГЕНІВСЬКОЇ ДИФРАКЦІЇ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТРИВИМІРНИХ ОБ'ЄКТІВ

*Овчаренко А.Ю., аспірант; Лебедь О.А., д. ф.-м. н.  
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

Дифракція рентгенівського випромінювання (РВ) є чутливою до розподілу електронної густини досліджуваного об'єкта, тому дане явище набуло широко використовується у різних галузях. Це можуть бути рентгенівські дифрактометри та спектрометри, які використовуються для дослідження кристалічної структури речовин, аналізу фазового складу, визначення параметрів кристалічної ґратки тощо. Медицина потребує наявності рентгенівських апаратів для отримання зображень внутрішніх органів, кісток та тканин, у діагностичних системах, таких як комп'ютерна томографія (СТ), для отримання детальних тривимірних зображень. Крім того, виробництво, матеріалознавство та інженерія використовують дифракцію РВ для аналізу матеріалів, виявлення дефектів у металевих конструкціях, контролю якості зварювання та інших промислових процесах. Наукові дослідження у біології та хімії використовують це явище для дослідження структури біомолекул, кристалічних комплексів біологічно активних сполук, біологічних мембран та інших об'єктів.

Розроблено алгоритм розрахунку дифракції рентгенівського випромінювання ( $\lambda = 1.5 \cdot 10^{-4}$  мкм) на тривимірному об'єкті, який дозволяє отримати дифракційне зображення для різних кутів орієнтації об'єкта з подальшим відновленням геометричної форми об'єкта. Розрахунок результату дифракції від досліджуваного об'єкта було здійснено на основі формули Френеля-Кірхгофа для комплексної амплітуди  $\psi(x_{scr}, y_{scr})$  [1,2]:

$$\psi(x_{scr}, y_{scr}) = \frac{1}{i\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(ik(r+s))}{rs} \left[ \frac{\cos(n, r) + \cos(n, s)}{2} \right] \exp(i\phi) dx_{obj} dy_{obj} \quad (1)$$

$s = \sqrt{(x_{obj} - x_{source})^2 + (y_{obj} - y_{source})^2 + R^2}$ ,  $r = \sqrt{(x_{obj} - x_{scr})^2 + (y_{obj} - y_{scr})^2 + \Delta^2}$   
де  $\vec{s}$  та  $\vec{r}$  – вектори «джерело – об'єкт» і «об'єкт – екран» відповідно;  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання;  $k = 2\pi/\lambda$  – хвильове число;  $\vec{n}$  – нормаль до площини хвильового фронту після проходження випромінювання через об'єкт;  $\phi$  – додатковий фазовий зсув, викликаний впливом об'єкта на хвильовий фронт;  $R$  – відстань від джерела до площини об'єкта;  $\Delta$  – відстань від хвильового фронту до екрана.

На основі дифракційних картин (рис.1) по положенню локальних максимумів інтенсивності (для кожного із радіальних напрямків) було визначено контури об'єкта, залежно від його орієнтації у просторі. Сукупність одержаних контурів для інших кутів повороту дало змогу відновити геометричну форму об'єкта (рис. 2в).

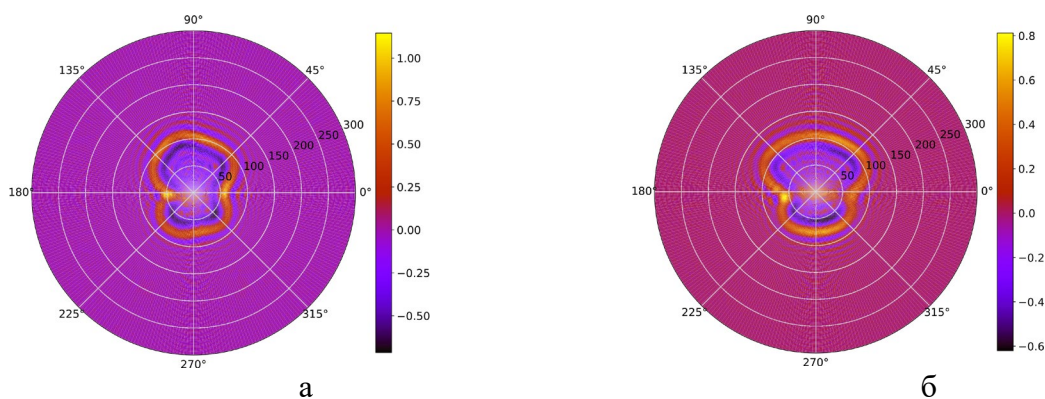


Рис.1. Очищені від апертурної дифракції зображення об'єкта для кутів повороту  $0^{\circ}$  (а) і  $63^{\circ}$  (б)

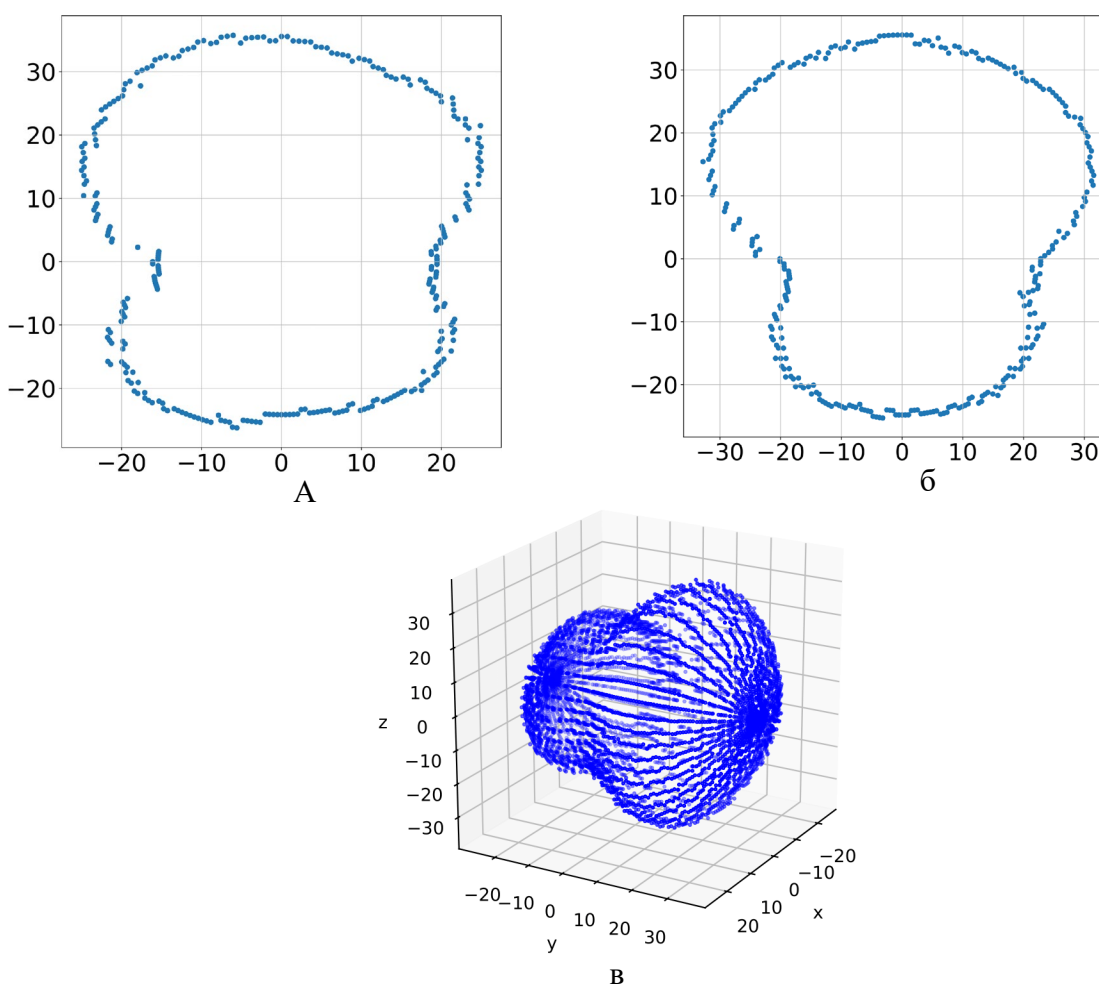


Рис. 2. Відновлені за результатами дифракції рентгенівського випромінювання контури об'єкта, орієнтованого під кутами  $0^{\circ}$  (а) і  $63^{\circ}$  (б) до напрямку поширення рентгенівського випромінювання та повністю відновлена геометрична форма об'єкта (в).

У даній праці проведені дослідження дифракції рентгенівського випромінювання з довжиною хвилі на тривимірних об'єктах довільної геометричної форми макроскопічного масштабу  $l \sim 0.1$  мм з малим декрементом заломлення  $\delta = 10^{-6}$  методом комп'ютерного моделювання в рамках теорії Френеля-Кірхгофа. Були знайдені оптимальні параметри (відстані від джерела випромінювання до об'єкта та від об'єкта до детектора, кількості точок для проведення інтегрування чисельними методами, розміри апертури та ін.) для одержання найбільш якісних зображень досліджуваних об'єктів. На основі отриманих дифракційних картин були побудовані тривимірні зображення зразків. Встановлена повна

відповідність цих зображень зі створеними модельними тривимірними об'єктами, на яких проводилось моделювання рентгенівської дифракції.

#### Список використаних джерел

- [1] D. Paganin, Coherent X-Ray Optics. Oxford Univ. Press, 2013.  
[2] E. Wolf, M. Born, Principles of Optics. Cambridge Univ. Press, 2020.

### **СКАНУЮЧИЙ СТІЛ ТРИМАЧА ПІДКЛАДОК ДЛЯ ВАКУУМНОЇ КАМЕРИ ВУП-5М**

**Коломієць В.М., к.ф.-м.н.; Павленко Ю.А., пров. інж.; Ігнатенко С.М., м.н.с.;  
Кравченко С.М., м.н.с.; Гончаренко О.І., асп.**  
*Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

При використанні магнетронних розпилювальних систем для отримання високих показників однорідності товщини покриттів на підкладках останні потрібно переміщувати в процесі напилення над мішенню магнетрона по заданій оператором програмі. При цьому, керування цим переміщенням має бути за межами вакуумної камери і не повинно порушувати вакуумну щільність.

Під час роботи напилювальних систем матеріал мішені, що розпилюється, покриває не тільки підкладку, а інші частини вакуумної камери. Металізація ізоляційних елементів електропроводки і вакуумних герметичних електроводів, а також рухомих елементів механізмів, розташованих у вакуумній камері, може призвести до аварійних ситуацій. Для вирішення цієї проблеми вищевказані елементи повинні мати екрани захисту з матеріалів, які мають невисокі значення коефіцієнту газовиділення. Зокрема, при роботі магнетронної розпилювальної системи, до виходу магнетрону на робочий режим, між об'єктом напилення і магнетроном повинна бути заслінка, рух якої керується поза межами вакуумної камери [1-4].

Для вирішення задачі щодо покращення однорідності товщини покриттів в ІПФ НАН України була розроблена конструкторська документація і створений скануючий стіл тримача підкладок для вакуумної камери приладу ВУП-5М (рис.1).

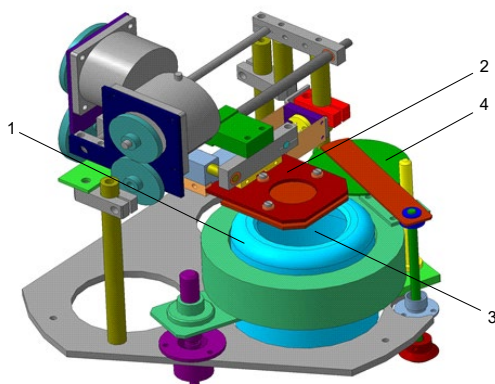


Рис. 1. 3D модель скануючого стола тримача підкладок для вакуумної камери приладу ВУП-5М: 1 – магнетрон; 2 – підкладкотримач; 3 – мішень; 4 – заслінка

Створений скануючий стіл розрахований на магнетрони з діаметром мішені до 60 мм, який може бути оснащений розбалансуючим магнітом або без нього. В процесі напилення підкладка переміщується за допомогою крокових двигунів по координатах X (переміщення до 140 мм) та Y (переміщення до 72 мм) над мішенню магнетрона по програмі, що задана оператором, з вибраними швидкостями та діапазоном переміщення по кожній координаті.

Координата Z (відстань мішень – підкладка) – фіксована, і її можна встановити лише перед напильником при відкритій вакуумній камері. Скануючий стіл тримача підкладок має такі основні можливості та особливості: забезпечення нагріву підкладки (галогенова лампа типу JC 50W) до необхідної температури з контролем її величини за допомогою закріпленої термопари; забезпечення переміщення підкладки в зону її нагріву перед технологічним процесом напильника; для закріплення кількох підкладок тримач зразків має ряд різьбових отворів; рухомі каретки столика мають вимикачі на крайніх положеннях; електроживлення елементів стола здійснюється провідниками у фторопластовій ізоляції через наявні вакуумно-герметичні роз'єми вакуумної камери приладу ВУП-5М; рухомі елементи конструкції захищені екранами від матеріалу розпильника.

Для управління механізмами скануючого стола тримача підкладок розроблено програмне забезпечення (ПЗ) на мові програмування Java. Для роботи ПЗ достатньо будь-який комп'ютер, який підтримує Windows 7 x86 або x64 з USB 2.0 інтерфейсом. ПЗ дозволяє здійснювати керування та відстеження переміщення тримача підкладок в автоматичному та ручному режимі, за однією чи двома осями одночасно, керувати підігрівом тримача та інформувати користувача через заплановані інтервали часу або по закінченню алгоритмів про зміну стану системи. На головному екрані ПЗ відображено мнемосхему, над якою візуально зображено тримач та його координати. Під мнемосхемою знаходяться система ручного керування переміщенням та нагрівом; система автоматичного переміщення з наперед заданими алгоритмами роботи; налаштування ПЗ та модуля блока керування.

Ручне керування дозволяє здійснювати переміщення тримача за двома координатами по черзі та керувати підігрівом. В цьому режимі відсутні обмеження, окрім обмеження переміщення по осям.

Автоматичне керування дозволяє проводити автоматичну роботу з переміщення за заданим алгоритмом. Для налаштування цього режиму потрібно встановити вид переміщення (змійка, растр, спіраль), швидкість переміщення (в двох перших алгоритмах по різних осях, в останньому лінійна швидкість переміщення тримача) та умову завершення роботи: через певний час чи за досягненням певної позиції. Налаштування ПЗ включає ліміти швидкостей, потужності нагріву, коефіцієнти перерахунку позиції в мм, налаштування порту зв'язку.

### **Список використаних джерел**

- [1] Технічні умови та технічний опис вакуумної напильювальної системи типу ВУП-5М.
- [2] Б. С. Данілін, В. К. Сирчін, Магнетронні розпильювальні системи, М.: Радіо і зв'язок, 1982.
- [3] В. Ф. Гайдуков, В. П. Колеснік, Л. В. Літовченко, В. В. Колеснік, Д. В. Слюсар, Проектування і розрахунок вакуумних систем, випробувальних стендів і технологічних установок. Курс лекцій, К., 2009.
- [4] І. І. Медніков, Введення руху у вакуум, Л.: Машинобудування, 1974.

## ***ВПЛИВ МАЛИХ ВІДХИЛЕНЬ МАГНІТНОГО МОМЕНТУ ВІД ОСІ АНІЗОТРОПІЇ НА ПОГЛИНАННЯ ЕНЕРГІЇ ЗМІННОГО ПОЛЯ ФЕРОМАГНІТНОЮ НАНОЧАСТИНКОЮ В РІДИНІ***

***Павлюк М. О., аспірант***

*Сумський державний університет, Суми, Україна*

Розглядається модель феромагнітної рідини, яка складається з однакових сферичних одновісних феромагнітних наночастинок, зважених у в'язкій рідині. Вплив в'язкого тертя моделюється силою Стокса, теплові флуктуації нехтуються, а скінченність анізотропії моделюється малими відхиленнями магнітного моменту від осі анізотропії. Відповідні

розрахунки показують, що модель відповідає параметрам, характерним для реальних ферорідин. Попередні очікування полягають у тому, що модель, розвинена у роботі [1] для жорсткого диполя зазнає модифікацій, що будуть виражені певними характерними коефіцієнтами. Припущення про наявність лише невеликих відхилень магнітного моменту від осі анізотропії, дозволять, з однієї сторони, записати систему рівнянь руху, придатну до подальшого аналітичного розв'язання, а, з іншої, дозволять врахувати анізотропію. Методологічне значення такого підходу особливо цінна в контексті побудови придатної до аналізу стохастичної моделі, яка у загальному випадку є надзвичайно громіздкою [2].

В результаті було отримано відповідні розв'язки рівнянь руху та інтегральний вираз потужність втрат

$$q = \frac{h \cdot v^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} dt \tanh \left[ \frac{h(1+\alpha\chi)^2}{v[\alpha^2 + ((1+\alpha\chi)^2)](1+\chi^2)} - \frac{1}{2} \ln \left( \tan \frac{\theta_0}{2} \right)^2 \right] \sin vt \quad (1)$$

де  $h$  – безрозмірна амплітуда зовнішнього магнітного поля,  $v = \Omega/\Omega_r$  – безрозмірна частота зовнішнього магнітного поля,  $\chi = \Omega_{cr}/\Omega_r$  – відношення характерної частоти обертання до частоти феромагнітного резонансу,  $t$  – безрозмірний час  $\theta_0$  – початкове положення полярного кута магнітної наночастинки відносно осі анізотропії. Саме параметри  $\chi$  та  $\alpha$  визначають різницю порівняно з аналогічним виразом, поданим у роботі [2]. Поліноміальний характер залежності від зазначених величин зумовлює наявність максимумів та мінімумів у результуючій потужності втрат, що дає підстави говорити про можливість оптимізації процесу поглинання енергії з точки зору отримання максимальній швидкості нагрівання.

З цією метою вираз (1) було проінтегровано чисельно. З метою виявлення впливу параметрів на потужність поглинання було побудовано залежності  $q(v)|_{\chi, \alpha, \theta_0}$ ,  $q(\chi)|_{v, \alpha, \theta_0}$ ,  $q(\alpha)|_{v, \chi, \theta_0}$ ,  $q(\theta_0)|_{\chi, \alpha, v}$ . Отримані залежності інтерпретовані з позицій характерних реакцій та їх тривалостей для магнітної та механічної підсистем. Зокрема, показано, що потужність максимально зростає для значень  $v \sim 0.1$ ,  $\chi \sim 1$ .

#### Список використаних джерел

[1] T. V Lyutyu, "Dynamics and energy dissipation of a rigid dipole driven by the RF-field in a viscous fluid: Deterministic approach," *The European Physical Journal E*, vol. 41, no. 12, p. 142, Dec. 2018, doi: 10.1140/epje/i2018-11756-x.

[2] J. Weizenecker, "The Fokker-Planck Equation for Coupled Brown-Néel-Rotation," *Phys Med Biol*, vol. 63, no. 3, p. 35004, 2018, [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/0031-9155/63/i=3/a=035004>

### **МОТИВУВАННЯ УЧНІВ ДО НАВЧАЛЬНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ З ФІЗИКИ ЗА УМОВ ДИСТАНЦІЙНОГО ТА ЗМІШАНОГО НАВЧАННЯ**

**Пасько О.О. к.пед.н., доц., Посенко А.В., студентка**  
Сумський державний університет, Суми, Україна

Самостійність є однією з ключових характеристик дистанційного навчання, і мотивація в цьому контексті відіграє вирішальну роль. Факторів, що сприяють зниженню навчальної мотивації учнів на даний час дуже багато. Відсутність регулярного контакту зі вчителем, труднощі з доступом до необхідних навчальних ресурсів, відсутність достатніх навичок роботи з цифровими інструментами, відсутність гаджетів, інтернету, побутовий шум, відсутність можливості створити зручне робоче місце та, насамперед, стрес, викликаний зовнішніми обставинами, звичайно, негативно позначається на мотивації школярів до навчання. Дистанційна форма навчання вимагає від школяра високого рівня самодисципліни та самоорганізації, що не завжди є сильною стороною учня. Вирішення

проблеми мотивації в дистанційному та змішаному навчанні вимагає комплексного підходу, який включає технічну, педагогічну та психологічну підтримку учнів.

Серед способів посилення навчальної мотивації учнів за дистанційної форми роботи, варто виокремити такі. Насамперед, важливо, щоб вчителем був розроблений навчальний курс для учнів (наприклад, в MS Teams чи Google Classroom). Наявність такого курсу має щонайменше дві переваги. По-перше, слугує інструментом для підтримання регулярного зворотного зв'язку з учнями через індивідуальні консультації, оцінювання робіт та надання рекомендацій для самостійного вивчення матеріалу. Регулярне надання конструктивної зворотного зв'язку стимулює самостійну роботу учнів та посилює їхню мотивацію до навчання. По-друге, сервіс надає вчителю можливість використовувати інтерактивний контент для взаємодії з учнями, зокрема, відеофрагменти із завданнями, симуляції експериментів, комп'ютерні моделі та віртуальні досліди, які стимулюють інтерес до вивчення фізики.

Окрім сервісу, де розміщені навчальні матеріали, важливо мати чат для спілкування з класом в одному з месенджерів, що забезпечить швидку взаємодію між учнями та педагогом, а також учнів між собою, що допоможе підтримувати соціальний контекст навчання.

Значний потенціал у посиленні пізнавального інтересу учнів, розвитку в них самостійності, а також формування експериментаторських навичок в умовах дистанційного й змішаного навчання мають відомі в методиці навчання фізики домашні досліди та спостереження учнів. Завдання щодо здійснення домашніх спостережень передбачає збирання фактичного матеріалу щодо перебігу певного явища чи процесу або ж спостереження явищ, які характеризуються довготривалістю перебігу. Надалі цей матеріал використовують у процесі пояснення нового навчального матеріалу чи під час його закріплення. Домашні ж досліди сприяють у більшій мірі розвитку самостійності та дослідницьких навичок учня: він має самостійно створити умови для експерименту, дібрати необхідні матеріали вдома або навіть виготовити прилад чи окремий його елемент. Це стимулює розвиток творчості та креативності, критичного мислення, аналітичних навичок та навичок самостійної роботи та посилює у школярів пізнавальний інтерес.

Для розширення можливостей традиційного домашнього експерименту з фізики доцільно використовувати спеціалізовані мобільні додатки. Зокрема, за допомогою сервісу «Lab4Physics» гаджет учня можна перетворити на лабораторний інструмент та використовувати як обладнання під час проведення фізичних експериментів. Для налаштування роботи датчиків, вбудованих у смартфон, теж існують мобільні додатки: датчик відстані (Smart Measure); датчик прискорення (SparkVue, AccelGraph, AccelMeter, parkVue, Accellogger); гіроскоп (Smart Measure); барометр (Barometer); датчик освітленості (Lux Metr, Light Meter, Luxmeter); GPS-трекер (My Tracks), TraceMyTrack; акустичний датчик (Audio Kit для iOS, FuncGen для Android). Щоб визначити, якими саме датчиками, оснащений смартфон, можна скористатися програмою Sensor Kinetics (<http://goo.gl/gTLJyC>).

Створення інтерактивного навчального контенту, виконання учнями домашніх спостережень та дослідів з фізики, а також підтримання постійного зворотного зв'язку з учителем сприятиме посиленню інтересу до вивчення фізики в умовах дистанційного та змішаного навчання.

#### Список використаних джерел

[1] Google Classroom: інструкція, як самостійно створювати онлайн-курси. – URL: <https://osvitoria.media/news/google-classroom-instruktsiya-yak-samostijno-stvoryuvaty-onlajn-kursy/> (09.04.2024).

[2] Фундаментальний фізичний експеримент у навчанні фізики : навчальний посібник / О. О. Пасько, Л. В. Одноворець. – Суми : Сумський державний університет, 2021. – 122 с.

## **ПРОБЛЕМА УЗАГАЛЬНЕННЯ ТА СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ЗНАТЬ УЧНІВ З ФІЗИКИ**

*Пройдисвіт Д.О., магістрантка; Салтикова А.І., к.ф.-м.н, доц.*

*Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Суми, Україна*

Нові тенденції в розвитку системи неперервної освіти вимагають приділення належної уваги формуванню вмінь здобувачів освіти засвоювати та використовувати інформацію, опанувати такі механізми мислення, які нададуть можливість творчо підійти до розв'язання поставлених перед ними задач. Під час навчання фізики учні повинні не тільки навчитися вирішувати типові завдання, а й порівнювати, аналізувати, систематизувати матеріал, а найголовніше, застосувати свої знання у повсякденному житті. І, саме, вміння привести знання у струнку систему є одним із ефективних засобів їх засвоєння. В Офіційному звіті Українського центру оцінювання якості освіти про результати проведення НМТ у 2023 році стверджується, що більшість учасників ЗНО і НМТ демонструють низькі результати виконання деяких завдань, що свідчить про фрагментарні знання з фізики та відсутність сформованих базових умінь і навичок із практичного застосування теорії. Це є наслідком методичних проблем у викладанні предмета та його вивченні в українських школах. Отже існує протиріччя між необхідністю формування у старшокласників умінь та навичок систематизації та узагальнення знань та недостатньою розробленістю методичних прийомів та способів логічної структуризації навчального матеріалу як засобу систематизації та узагальнення знань з фізики.

Хоча слід відмітити, що на сьогодні в календарне планування уроків з фізики для досягнення тісного зв'язку між окремими питаннями, створення системи знань і умінь включені уроки систематизації та узагальнення навчального матеріалу з певної теми. Ці уроки набули особливої актуальності у зв'язку з новими цілями освіти, поставленими перед школою. Розвиток учнів, формування їх розумових і творчих здібностей, неможливі без подання структури знання і відображення в ньому етапів пізнання [1]. Форми роботи на таких уроках досить різноманітні: підсумкові бесіди, оглядові лекції, рішення комбінованих задач, перегляд навчальних і науково-популярних фільмів, уроки-конференції, уроки-змагання тощо, проте на всіх таких заняттях вчитель повинен прагнути привести знання учнів в струнку систему, створити умови, щоб учні самі встановлювали нові зв'язки між вже відомими фактами. Відмітимо, що систематизація знань невіддільна від їх узагальнення: чим ширше узагальнення, тим більше відображено між ними зв'язків і відношень, тим більш широке коло знань об'єднується в систему. При узагальненні навчального матеріалу не тільки відтворюються найбільш важливі факти, поняття, уміння, але й встановлюються логічні зв'язки між ними [2]. Навчальний матеріал при цьому переосмислюється повністю, що приводить не тільки до зміцнення засвоєного, але й до побудови знань в логічну, структурну систему, що підвищує якість засвоєння навчального матеріалу, розвиває розумову діяльність, виводить учнів на принципово новий рівень розуміння. Узагальнення знань дозволяє розвивати вміння розв'язувати задачі шляхом перенесення способу дій на цілий клас аналогічних задач, що є одним з основних завдань навчання взагалі.

Отже, можна стверджувати, що формування в учнів цілісного уявлення про сучасну фізичну картину світу, навичок та умінь систематизувати та узагальнювати свої знання та досягнення запланованих результатів навчання буде забезпечено, якщо виявити рівні логічної структуризації навчального матеріалу як засобу систематизації та узагальнення знань учнів з фізики.

### **Список використаних джерел**

[1] Сиротюк В.Д. «Сучасний урок фізики, його особливості і методика проведення». Наукові записки. Збірник наукових праць. Педагогічні науки. Вид.Київ. НПУ імені М.П. Драгоманова. Випуск 141, с.189-203, 2018.

[2] Паращич О.С. «Узагальнення знань з фізики як засіб підвищення рівня їх засвоєння учнями основної школи» Науковий часопис НПУ імені М.П. Драгоманова . Серія 3. Фізика і математика у вищій і середній школі Вид.Київ. НПУ імені М.П. Драгоманова. Випуск 19, с.27-32, 2017.

### **ЕЛЕМЕНТИ БІОФІЗИКИ В ОСВІТНЬОМУ ПРОЦЕСІ З ФІЗИКИ**

*Пушкар І.В., магістрантка; Салтиков Д.І., доктор філософії (природничі науки)  
Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Суми, Україна*

Навчання фізики у закладах загальної середньої освіти спрямоване на розвиток особистості учня, становлення стилю мислення, який відповідає науковому світогляду, формування предметної, науково-природничої та ключових компетентностей. Фізика як фундаментальна наука про природу, тісно пов'язана з іншими природничими науками, такими як астрономія, хімія, біологія. Ці об'єктивні зв'язки між науками знаходить відображення і в процесі навчання фізики. При вивченні різних розділів фізики важливо формувати цілісність наукової картини світу, демонструючи міжпредметні зв'язки, які в свою чергу активізують навчально-пізнавальну активність учнів. Розглянемо це на прикладі використання елементів біофізики на уроках фізики в 7 класі. Біофізика – це наука, яка вивчає фізичні та фізико-хімічні процеси в живих організмах. Вона є наче симбіозом фізики, хімії та біології. При вивченні будь-якої теми з фізики, завжди можна знайти відповідний процес в живій природі. Біофізика дає можливість продемонструвати учням, що фізика це і явища, які відбуваються в атомному ядрі, яке триває сотні років, і процес, який відбувається цієї миті в нас самих та навколо нас, що знання деяких явищ може полегшити та краще зрозуміти світ навколо нас.

При вивченні розділу «Механічний рух», можна зацікавити учнів, розповівши про швидкості руху різних тварин та птахів, продемонструвати траєкторії їхніх рухів. Слід також, проаналізувати причини, чому так відбувається і що впливає на швидкість руху різних тварин.

У розділі «Взаємодія сил» дуже цікавою буде для учнів інформація про способи використання явища інерції летючими рибами чи білками летягами. Також варто звернути увагу учнів на те, як плазуни та риби переборюють силу тертя і використовують для цього слиз, який полегшує пересування тварин по землі та у воді.

Тема «Сила тяжіння. Вага тіла. Невагомність.» дає можливість пояснити дітям, як почувуються космонавти, які працюють на орбітальній станції, розповісти про зміни в організмі, які відбуваються в стані невагомості та чому при підйомі в ліфті може паморочитися голова.

Тему «Деформація тіл та сила пружності» можна урізноманітнити прикладами з тваринного світу: чому при падінні з висоти одні тварини гинуть, а інші лишаються неушкодженими, чому при буревії одні рослини лише гнуться, а інші вириваються з коренем.

Під час вивчення розділу «Тиск та плавання тіл», не зайвим буде звернути увагу на те, як птахам вдається триматися в повітрі та на воді, як риби регулюють глибину занурення використовуючи плавальний міхур. Необхідно звернути увагу на те, як атмосферний тиск діє на людину, розповісти, що тиск рідин в середині людини зрівноважує атмосферний тиск ззовні, але при підвищенні атмосферного тиску в середині організму людини, як відповідь на подразник і для врівноваження сил, відбувається підвищення внутрішнього тиску і людина почувається зле.

У темі «Звукові хвилі. Інфразвук та ультразвук» слід звернути увагу на те, що ультразвукові хвилі негативно діють на деякі організми й у сучасному світі це широко використовується для боротьби з комарами, мишами та іншими шкідниками. Маленькі

рибки, пуголки та інфузорії гинуть під впливом на них ультразвуку. Ультразвук став важливою частиною сучасної медицини, він широко використовується для діагностики різних захворювань та перевірки стану організму. Також його використовують для знезараження інструментів та навіть проводять хірургічні операції з використанням ультразвуку.

Вивчення теми «Оптика» можна урізноманітнити особливостями будови та світло сприйняття представників тваринного світу. Розповісти про явище флюоресценції та хемілюмінесценції в деяких тварин [1]. Також важливо пояснити дітям дію ультрафіолетових та рентгенівських променів на живі організми, розповісти де і з якою метою їх використовують.

Елементи біофізики в освітньому процесі з фізики є досить важливим компонентом навчання. Вони розширюють світогляд учнів та сприяють формуванню цілісної наукової картини світу. Поєднання біології та фізики, перетворює фізику на живу науку, дає зрозуміти учням її важливість. Переплетінням цих дисциплін можна пояснити, що з багатьма явищами, які вивчає фізика вони вже ознайомлені, адже рух, швидкість, силу звуку та багато інших фізичних явищ діти опанували й вивчили, навіть не знаючи цих слів ще з дитинства. І вчитель повинен упорядкувати ці знання, розширити їх обрії, закласти основи для розвитку цікавості до пізнання природничих наук.

#### Список використаних джерел

[1] Навчальна програма з фізики для 7-9 класів для загальноосвітніх навчальних закладів. Авторський колектив під керівництвом Ляшенка О. І. Затверджено Міністерством освіти і науки України (наказ № 804 від 07.06.2017)

### **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІОННОГО ПУЧКА В ДЖЕРЕЛІ НЕГАТИВНИХ ІОНІВ ВОДНЮ**

**Батурін В. А., к.ф.-м.н., с.н.с., Росенко О. Ю., м.н.с., Литвинов П. О., с.н.с., Карпенко  
О.Ю. м.н.с.**

*Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

Пучки негативних іонів водню активно використовуються в різноманітних сферах науки і медицини. На даний час, найбільш актуальне їх використання в термоядерній енергетиці для нагріву плазми, в медицині, для реалізації протонної та бор-нейтронної терапії, що відкривають нові можливості для лікування злоякісних пухлин [1], а також в прискорювальній техніці, для проведення фундаментальних досліджень. Наприклад, джерело негативних іонів водню встановлене на лінійному прискорювачі Linac 4 в CERN [2], саме з нього починається процес генерації високоенергетичного пучка, на якому проводяться дослідження на Великому адронному колайдері LHC.

Отримання пучка негативних іонів водню це складна проблема, так як їх необхідно не тільки створити в плазмі, але й забезпечити мінімізацію процесів розвалу та нейтралізації іонів. Основний механізм утворення негативного іона водню – двоступінчаста об'ємна генерація [3], яка виглядає наступним чином:



Спочатку молекула водню  $H_2$  взаємодіє з швидким електроном ( $E_e > 15\text{eV}$ ) та переходить в коливально-збуджений стан  $H_2^{\ominus}(1)$ . Далі коливально-збуджена молекула водню взаємодіє з повільним електроном ( $E_e \sim 1\text{eV}$ ), що провокує її дисоціацію, в результаті чого утворюється протон та негативний іон (2). Для запобігання розвалу  $H^-$  необхідно створити відповідні умови при емісії, формуванню та транспортуванню пучка, так як енергія зв'язку додаткового електрона з атомом водню становить всього 0,75 eV.

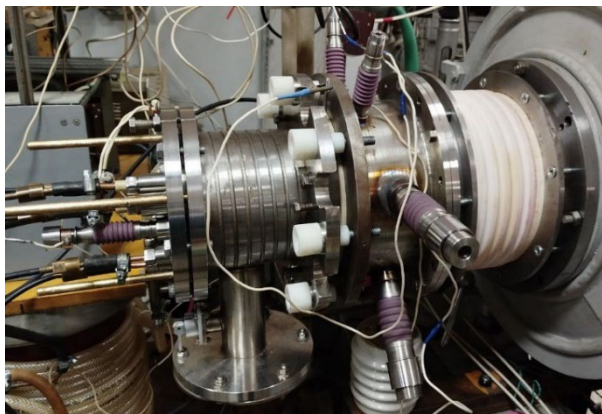


Рис. 1. Загальний вигляд джерела негативних іонів водню

імпульсний клапан, робота якого регулюється спеціальним блоком живлення, де можна змінювати 4 параметри:  $\nu$  – частота, Гц,  $\tau_{\text{кл}}$  – час відкривання клапана, мс,  $\tau_{\text{імп}}$  – ширина електричного імпульсу, мс,  $\tau_{\text{затр}}$  – час затримки електричного імпульсу відносно газового, мс. Знято залежність іонного струму від струму на розряді, а також пораховано співвідношення струму іонів до струму супутнього пучка електронів, які емітуються з джерела разом з негативними іонами, так як мають той же знак заряду. Результати представлено в табл. 1. Результат отримано при значенні напруги екстракції – 20 кВ.

Таблиця 1

**Залежність іонного та електронного струмів від розрядного струму**

Розрядний струм, $I_p$ , А	Іонний струм $I_H$ , мА	Струм електронів, мА
40	8	85
60	11,5	165
80	12,5	270
100	15	370
120	16	550

З даних таблиці можна бачити, що вдалося отримати струм  $H^-$  іонів на рівні  $\sim 15$  мА, що для джерела типу дуоплазмотрон з емісійним отвором  $\varnothing 3,6$  мм, без включення механізму поверхневої іонізації [4] з використанням матеріалів з малою роботою виходу (наприклад, цезію Cs) являється непоганим результатом. Щодо співвідношення струмів  $e/H^-$

, то в середньому цей показник дорівнює  $\sim 11 \div 34$ . Його значенням можна ефективно керувати за рахунок зміни конфігурації магнітного поля поблизу емісійного отвору, а також змінюючи потужність розряду та величину напруги екстракції пучка.

Планується подальша робота по збільшенню виходу іонного струму за рахунок використання в конструкції додаткових механізмів, які будуть сприяти більш ефективному процесу генерації необхідних частинок в плазмі та їх збереженню на шляху до іонно-оптичної системи.

**Список використаних джерел**

- [1] Malouff, T.D.; Seneviratne, D.S.; Ebner, D.K.; Stross, W.C.; Waddle, M.R.; Trifiletti, D.M.; Krishnan, S. Boron Neutron Capture Therapy: A Review of Clinical Applications. *Front. Oncol.* 2021, 11, 601820.
- [2] J. Lettry, M. Vretenar, *New Injectors: The Linac4 Project and the New H<sup>-</sup> Source*, Advanced Series on Directions in High Energy Physics, The High Luminosity Large Hadron Collider, pp. 295-310 (2015).
- [3] Daniel C. Faircloth, *Ion sources for high-power hadron accelerators*, Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Oxfordshire, UK, p. 27. 2013.
- [4] P. Massmann, H.J. Hopman, J. Los, *Negative surface ionization of hydrogen and its application to plasma diagnostics*, Nuclear Instruments and Methods, Volume 165, Issue 3, 15 October 1979, Pages 531-535.

## **МЕТОД МАЛОКУТОВОГО РОЗСІЯННЯ НЕЙТРОНІВ (МРН) ДЛЯ ВИВЧЕННЯ НАНОВКЛЮЧЕНЬ У ІНЖЕНЕРНИХ МАТЕРІАЛАХ**

**Рюхтін В. В.**

<sup>1</sup> Інститут ядерної фізики Чеської академії наук, Гусінець-Ржеж, Чеська республіка

Мікроструктура відкладень у твердих матеріалах істотно впливає на їх механічні властивості. Зазвичай, методи електронної мікроскопії використовуються для оцінки морфологічних характеристик таких відкладень, однак у багатьох випадках техніка малокутового розсіяння нейтронів (МРН) може бути більш ефективною завдяки унікальним властивостям нейтронів - високій проникній здатності нейтронів в твердих матеріалах, магнітній взаємодії, тощо. В цій презентації зібрані кілька прикладів застосування МРН по відношенню до інженерних матеріалів, які були реалізовані зокрема у лабораторії нейтронної фізики інституту ядерної фізики в Ржежі неподалік Праги.

Застосування МРН може служити для вивчення нано- та мезо-відкладень, пов'язаних з низькою концентрацією додавання міді в середньовуглецеві сталі для пружин (42SiCr) [1]. Було встановлено, що сплавлення з міддю збільшує межу текучості, внаслідок утворення дрібних відкладень мідних наночастинок. Для точного визначення середнього розміру та об'ємної частки цих нанорозмірних частинок, викликаних відпусканням при 400 чи 500 °С зокрема, аналізувалась магнітна компонента МРН. У цьому застосуванні МКР виявилась досить ефективною і в перспективі може використовуватися для дослідження кінетики відкладень міді в подібних матеріалах на місці їх утворення.

Дослідження композитів з використанням SANS на прикладі вольфраму (W) у зв'язуючому кобальті (Co) може служити прикладом корисності МРН. У вольфрам-карбід (WC)-Co композитних матеріалів з додаванням ванадію (V), *in-situ* та *ex-situ* МРН і експерименти з ультра-малокутовим нейтронним розсіянням (УМРН) допомогли пояснити, як домішки V впливають на нано- та мікроструктуру під час спікання і призводять до зменшення розмірів зерен WC [2]. Тоді як SANS кількісно оцінив наномасштабні міжфазні шари, відповідальні за інгібування зеренного зростання, USANS застосовувався для вивчення мікроструктурного удосконалення.

Дослідження будівельних матеріалів, оброблених різними консолідантами, було проведено за допомогою МКР та конвенційних порометричних методів, таких як ртутна інтрузія та скануюча електронна мікроскопія [3]. Було пояснено відношення між зміною мікроструктури в мезоскопічному діапазоні (сотні нанометрів) та покращенням механічних властивостей. Таке оброблення може бути застосоване як для нового будівництва, так і для захисту старих історичних вапнякових будівель від впливу атмосферних явищ.

### **Список використаних джерел**

[1] A. Gokhman, Z. Nový, P. Salvetr, V. Ryukhtin, P. Strunz, P. Motyčka, J. Zmeko, J. Kotous, *Materials*, 14, (2001) 1445.

[2] A. B. Yildiz, J. Weidow, V. Ryukhtin, S. Norgrend, G. Wahnström, P. Hedström *Scripta Mat.* 173, (2019) 106-109.

[3] V. Ryukhtin, Z. Slížková, P. Strunz, P. Bauerová & D. Frankeová *J. Appl. Cryst.* 56 (2023).

**ПІЗНЯ СТАДІЯ СЕГРЕГАЦІЇ ДОМІШКИ НА МІЖЗЕРЕННІЙ МЕЖІ У ВИПАДКУ  
УТВОРЕННЯ СФЕРИЧНИХ ВИДІЛЕНЬ НОВОЇ ФАЗИ, РІСТ ЯКИХ ЛІМІТУЄТЬСЯ  
ПОВЕРХНЕВОЮ КІНЕТИКОЮ**

*Коропов О. В., к.ф.-м.н., доц., с.н.с.; Скороход Р. В. м.н.с.  
Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

Явище сегрегації в металах і сплавах, як відомо, полягає у просторовому перерозподілі й виділенні компонентів сплаву, легуючих або домішкових елементів з об'єму матеріалу на стоках дефектів, таких як: пори, дислокації, вільні поверхні, міжзеренні та міжфазні межі. В пересиченому твердому розчині атомами домішки при достатньо високих температурах відбувається сегрегація домішки з об'єму зерна до міжзеренних меж. Це призводить до збагачення атомів домішки на міжзеренній межі. Дане явище називається рівноважною сегрегацією [1]. Вважається, що матриця-сплав є стабільною, тобто в ній не відбуваються процеси дифузійного перерозподілу компонентів сплаву. Зміни концентрації домішкових елементів на міжзеренній межі можуть призвести до пересичення відповідного двовимірного твердого розчину та, як наслідок, до утворення зародків нової фази.

У випадку пересиченого твердого розчину в результаті сегрегації домішки з об'єму зерен на міжзеренній межі в її площині можуть утворюватися сферичні виділення атомів домішки (острівці). На пізній стадії процесу росту нової фази можна вважати, що радіус виділення  $R=R(t)$  достатньо великий ( $R \gg \delta$ ,  $\delta$  – товщина міжзеренної межі). Ця стадія була відкрита Оствальдом в 1900 р. [2] і одержала назву визрівання Оствальда (ВО) або коалесценції Оствальда виділень нової фази. З точки зору теорії фазових переходів ВО є останньою, так званою пізньою стадією фазового переходу 1 роду (див. [3]).

В даній роботі теоретично розглянуто ансамбль сферичних виділень нової фази на міжзеренній межі. Вважається, що поодинокі виділення має радіус  $R=R(t)$  ( $R \gg \delta$ ) і перетинається міжзеренною межею (див. рис. 1).

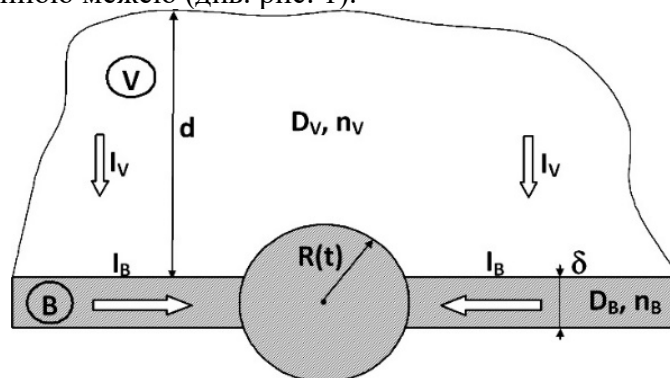


Рис. 1. Схематичне зображення поодинокого сферичного виділення нової фази. Тут і далі зміст позначень пояснюється в роботі [4].

Система рівнянь, яка описує ВО сферичних виділень, ріст яких лімітується поверхневою кінетикою вбудови атомів домішки в виділення складається з наступних [4]:

- 1) рівняння швидкості росту окремого виділення

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\mathfrak{B}}{2R} \left( \Delta_B - \frac{2\Gamma_B}{R} \right), \quad \mathfrak{B} \equiv \beta_B n_{B\infty} \omega \delta; \quad (1)$$

- 2) кінетичного рівняння для функції розподілу виділень нової фази за розмірами  $f(\rho, t)$ , яка нормована на густину виділень  $N(t)$  ( $N(t) = \int_0^\infty f(\rho, t) d\rho$ )

$$\frac{\partial f(\rho, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \rho} \left[ f(\rho, t) \frac{d\rho}{dt} \right] = 0; \quad (2)$$

- 3) рівняння балансу речовини в системі (закону збереження речовини)

$$Q \equiv \Delta_{B0} + \lambda^* \int_0^\infty \rho^3 f_0(\rho) d\rho = \Delta_B(t) + \lambda^* \int_0^\infty \rho^3 f(\rho, t) d\rho, \quad \lambda^* = \frac{4\pi R_0^{*3}}{3n_{B\infty} \omega (\delta + Cd)}. \quad (3)$$

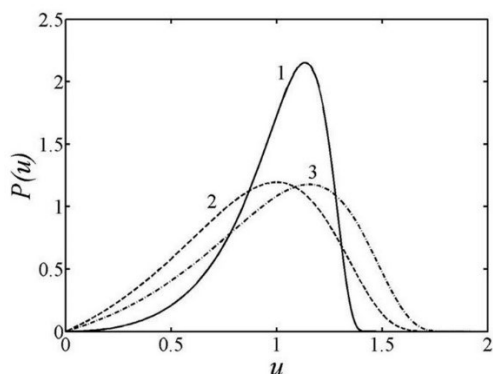


Рис. 2. Деякі функції  $P(u)$ , які одержані в теорії ВО: 1 – робота Ліфшиця і Сльозова [5] та дана робота, 2 – робота Вагнера [6], 3 – робота [7].

Сльозова [5]. Графік функції  $P(u)$  наведено на рис. 2 (крива 1).

В роботі знайдені асимптотичні (при  $t \rightarrow \infty$ ) часові залежності критичного радіуса виділення

$$R^{*3} = \frac{4}{9} \mathfrak{B} \Gamma_B t \left\{ 1 + \frac{3}{4 [\ln(\mathfrak{B} \Gamma_B t / R_0^{*3})]^2} \right\}, \quad (7)$$

пересичення твердого розчину атомів домішки

$$\Delta_B = \left( \frac{18 \Gamma_B^2}{\mathfrak{B}} \right)^{1/3} t^{-1/3} = \left( \frac{18 \Gamma_B^2}{\beta_B n_{B\infty} \omega \delta} \right)^{1/3} t^{-1/3}, \quad (8)$$

густини виділень (числа виділень на одиницю площі міжзеренної межі)

$$N(t) = A \left( \frac{R_0^*}{R^*(t)} \right)^3 = \frac{9}{4} \frac{A R_0^*}{\beta_B \Gamma_B n_{B\infty} \omega \delta t}, \quad (9)$$

коефіцієнта заповнення міжзеренної межі виділеннями [4]

$$Z(t) = \left( \frac{3}{2} \right)^{2/3} \frac{\pi R_0^{*3} u^2}{\lambda u^3} (\mathfrak{B} \Gamma_B t)^{-1/3}. \quad (10)$$

### Список використаних джерел

- [1] D. McLean, Grain Boundaries in Metals, Oxford: Clarendon Press, 1957.
- [2] W. Ostwald, «Über die vermeintliche Isomerie des roten und gelben Quecksilberoxyds und die Oberflächenspannung fester Körper,» Zs. Phys. Chem., vol. 34, p. 495-503, 1900.
- [3] V.V. Slezov, Kinetics of First Order Phase Transitions, Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2009.
- [4] О.В. Коропов та Р.В. Скороход, «Визрівання Оствальда сферичних виділень на міжзеренній межі, яке лімітується поверхневою кінетикою,» East European Journal of Physics, № 1, с. 75-85, 2019.
- [5] I. Lifshitz and V. Slyozov, «The kinetics of precipitation from supersaturated solid solutions,» J. Phys. Chem. Solids, vol. 19, № 1-2, p. 35-50, 1961.
- [6] C. Wagner, «Theorie der alterung von niederschlägen durch umlösen (Ostwald-reifung),» Zs. Elektrochem., vol. 65, № 7-8, p. 581-591, 1961.
- [7] О. Коропов, «Контрольоване поверхневою кінетикою визрівання Оствальда пласких включень на межі зерен,» Ж. Нано-електрон. фіз., т. 6, № 1, p. 01025, 2014.

## ЗАСТОСУВАННЯ ЗАСОБІВ МОБІЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПІД ЧАС ВИВЧЕННЯ ФІЗИКИ

*Стома В. М., доктор філософії, викладач спеціалізованого факультету  
ВСП «Сумський фаховий коледж НУХТ», Суми, Україна*

З початку повномасштабного вторгнення росії в Україну виникла потреба в організації якісного та безпечного освітнього середовища. Працюючи та навчаючись в умовах воєнного стану, часті тривоги, онлайн та дистанційне навчання вимагає від освітян організації якісного та безпечного освітнього середовища з використанням інформаційних та цифрових технологій. Викладачам освітніх закладів необхідно адаптуватися і враховувати умови, які радикально змінили організацію освітнього процесу.

Використовувати мобільні технології під час організації навчання допоможе оптимізувати освітній процес, підвищить зацікавленість у навчанні та стимулюватиме мотивацію у здобувачів освіти.

За визначенням ЮНЕСКО навчання, яке реалізується із застосування мобільної технології, окремо, чи спільно з іншими інформаційно-комунікаційними та цифровими технологіями, визначено як «мобільна освіта», або «mobile learning (mlearning)» [4].

Мобільні технології – це технології навчання, що базуються на використанні мобільних пристроїв (телефони, смартфони, планшети), мобільних застосунків або додатків (Google Play, App Store) [1].

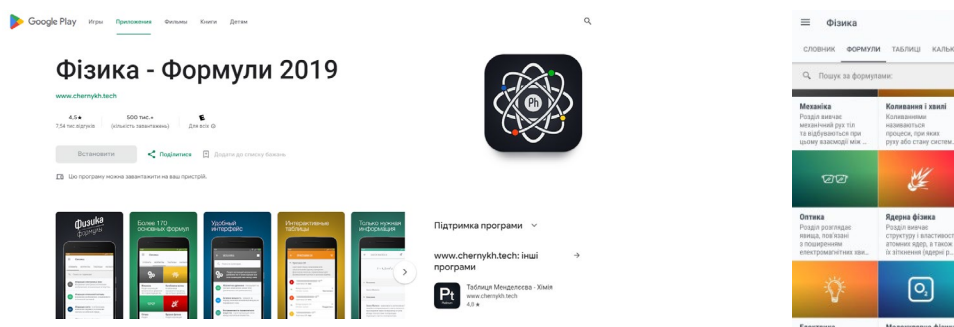
Мобільний додаток [2] являє собою програму, яка встановлена на тій чи іншій платформі на основі власного функціоналу передбачає виконання певних дій.

На думку Сокольниковою А. М. [3] використання мобільних додатків для навчання фізики в освітніх установах дозволяє: прискорити обмін інформацією між усіма учасниками освітнього процесу, провести інтенсифікацію і модернізацію навчального процесу; організувати розподілений освітній ресурс; забезпечити спільну діяльність студентів без прив'язки до місця розташування учасників освітнього процесу; використовувати мобільний пристрій в якості персональної медіатеки навчальних, методичних та довідкових матеріалів; підключати мобільний пристрій до приладів і пристроїв в мережі навчального закладу в освітніх і дослідницьких цілях.

В Інтернет магазинах представлена велика кількість вільно поширювальних освітніх мобільних додатків для вивчення природничих дисциплін.

Аналіз проведених нами мобільних додатків розміщених у магазині GooglePlay [5] дозволив їх поділити за дидактичним призначенням на кілька груп:

— **інформаційно-довідкові:** мобільні додатки які містять необхідну користувачу інформацію, теоретичний матеріал доповнений ілюстраціями, схемами, відео фрагментами, моделями фізичних явищ і процесів та дидактичне призначення яких узагальнення, систематизація знань, умінь та навичок з різних розділів фізики. На заняттях з фізики нами використовується додаток «Фізика. Формули» (рис.1) – збірник термінів, таблиць та формул фізики, які сортовані за розділами, дає можливість швидко відшукати формули за їх назвою.

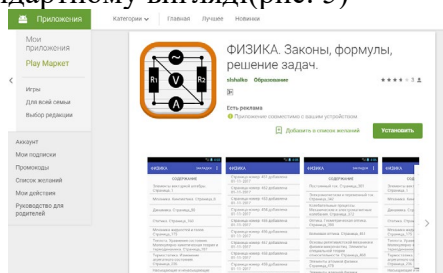


**Рис. 1. Інтерфейс «Фізика. Формули»**

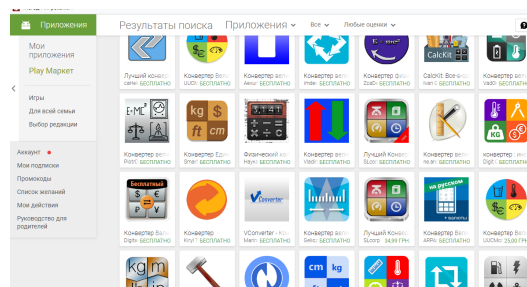
— **навчальні**, дидактична мета яких здобуття нових знань, умінь та навичок з різних розділів фізики та методики навчання фізики:

а) мобільні додатки призначені для ознайомлення з технологією розв'язування фізичних задач з основних розділів та тем курсу фізики. До таких відноситься, наприклад «ФІЗИКА. Закони, формули, розв'язання задач» (рис. 3). Додаток містить основні закони і формули елементарної фізики, та понад 800 різнорівневих задач з розгорнутими розв'язаннями, які вимагають застосування вищої математики.

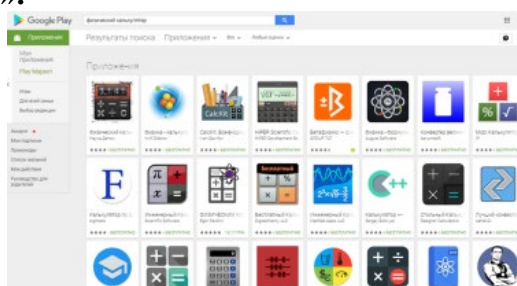
Для вирішення практико-орієнтованих завдань рекомендуємо ознайомитися з програмами-конвекторами в СІ позасистемних одиниць довжини і об'єму, які використовуються в різних галузях фізики (рис. 4). Для обробки результатів експерименту під час виконання лабораторних завдань та під час розв'язування завдань використовуємо інженерний (науковий) калькулятор. Інтерфейси програм різних виробників можуть істотно відрізнитися, але всі вони дозволяють оперувати числами, представленими в стандартному вигляді(рис. 5)



**Рис. 2. Інтерфейс «ФІЗИКА. Закони, формули, розв'язання задач».**

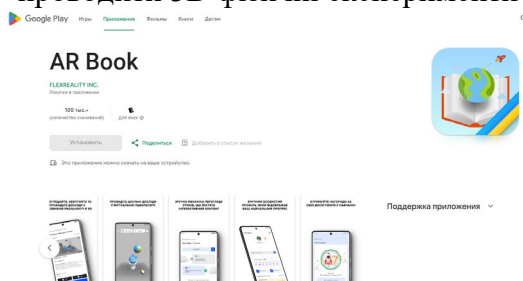


**Рис. 3. Додатки- конвектори.**

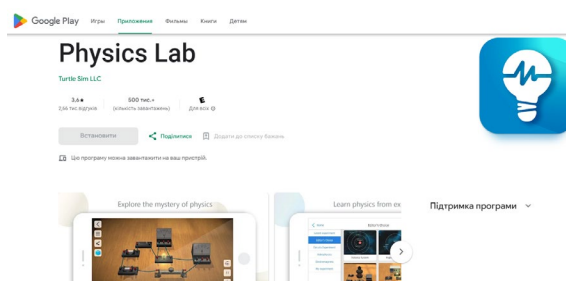


**Рис. 4. Додатки-канкулятори.**

б) мобільні додатки, за допомогою яких формується предметна компетентність здобувачів освіти. До таких належать AR Book (рис. 6) – це мобільний додаток, який містить відео уроки, 3D – дослідження із звуковим супроводом. За допомогою якого можна проводити 3D фізичні експерименти з фізики.



**Рис. 5. Інтерфейс «AR Book».**



**Рис. 6. Інтерфейс «Physics Lab».**

Мобільний додаток «Physics Lab» (рис. 6) допоможе вивчити курс електроніки та є електронним конструктором, за допомогою якого збирається та перевіряється працездатність зібраної схеми. Останні можна підключити до віртуального джерела живлення з необхідною напругою. Крім того, додаток передбачає можливість підключення до схем вимірювальних приладів.

в) мобільні додатки призначені для швидкої перевірки знань здобувачів освіти. За допомогою таких додатків проводять контрольні роботи, зрізи знань, тести та різні види оцінювання.

Нами використовуються наступні мобільні додатки:

1) Online Test Pad (рис. 7) – це безкоштовний багатофункціональний сервіс для проведення тестування та навчання. Сервіс складається з сервісів: конструктора тестів, опитувань, кросвордів; комплексних завдань; діалогових тренажерів.

2) Kahoot.com (рис. 8) – це популярний інструмент для створення інтерактивних опитувань, які можуть бути використані як для перевірки знань, так і для підвищення мотивації студентів. Додаток доступний для Android та iOS, і дозволяє створювати власні опитування або використовувати готові шаблони. Запитання завдань відображатимуться на гаджеті викладача — ноутбучі чи проекторі. А на гаджетах здобувачів освіти будуть відображатися лише варіанти відповіді, з яких треба обрати правильний. Викладач може робити опитування яскравими, що подобається студентам: додавати фото, малюнки, відео чи графіку. Також є можливість увімкнути на сайті режим різноманітних бонусів, наприклад — додаткові бали за швидкі відповіді. Це перетворює навіть складний іспит на цікаве змагання.

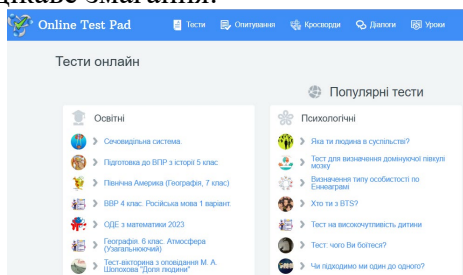


Рис. 7. Інтерфейс «Online Test Pad».

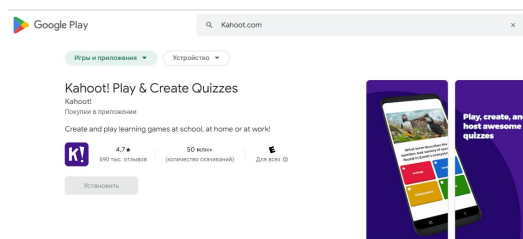


Рис. 8. Інтерфейс «Kahoot.com».

— *ігрові* – мобільні додатки за допомогою гри дозволяють краще пізнати суть фізичних явищ та процесів через їх візуалізацію. Дидактична мета таких додатків організація самоперевірки та перевірки рівня засвоєння навчального матеріалу. До таких додатків належать, наприклад «Фізична головоломка» (рис. 8) фізична гра в жанрі головоломки.

Таким чином, на сьогоднішній день розроблено значну кількість мобільних додатків для підтримки навчання фізики. Досить широкий спектр і різноманітність існуючих мобільних навчальних ресурсів дозволяють вибирати мобільні додатки відповідно до індивідуальних потреб, інтересів і рівня здобувачів освіти. На нашу думку, практичне застосування мобільних додатків несе в собі величезний потенціал, оскільки підвищує мотивацію і пізнавальну активність студентів, інтерес до вивчення фізики, допомагає індивідуалізувати навчання. Крім того, використання мобільних технологій сприяє розвитку інформаційно-цифрової компетенції і інтенсифікації самостійної роботи суб'єктів навчання в умовах військового стану.

### Список використаних джерел

- [1].Бабич А. З. Використання технології BYOD у процесі навчання в основній школі. Ukrainian Journal of Educational Studies and Information Technology. 2017. № 2. С. 1-4.
- [2].Білоус В. В. Мобільні додатки для навчання математики як засіб підвищення мотивації учнів молодшої школи. Відкрите освітнє е-середовище сучасного університету. 2017. № 3. С. 303–309.
- [3].Сокольников А. М. Мобільне навчання: проблеми та перспективи розвитку. Кібернетика та програмування. 2013. №6. С. 28–34.
- [4].Рекомендації UNESCO щодо політики мобільного навчання. URL: [https://www.futureschool.online/post/unesco\\_tools/](https://www.futureschool.online/post/unesco_tools/) (Дата звернення 04.04.2024).
- [5].Google Play URL: <https://play.google.com/store> (Дата звернення 04.04.2024).

## **ОПАНУВАННЯ ПРИРОДНИЧИХ НАУК ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ЕЛЕМЕНТ МЕДИЧНОЇ ОСВІТИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТРАНДИСЦИПЛІНАРНІСТІ**

*Федів В.І., д.ф.-м.н., проф.; Олар О.І., к. ф.-м.н., доц.; Бірюкова Т.В., к.т.н., доц.  
Буковинський державний медичний університет, Чернівці, Україна*

Хоча за останні 50 років міждисциплінарний і трансдисциплінарний підходи до знань отримали значний розвиток у системі вищої освіти, що пов'язано зі змінами в кількісному і якісному складі здобувачів освіти останніх поколінь, а також викликами суспільства до професійної підготовки майбутніх фахівців, які повинні набути компетенцій не тільки оволодіння знаннями, а й їх створенням, питання організації викладання та навчання у вищій школі, в цілому, і медичній, зокрема, стоять досить гостро.

Сьогодні важлива організація навчання з мінімізацією методів пасивного засвоєння студентами навчального матеріалу, опираючись на процеси запам'ятовування, з розстановкою акцентів на знаннях, які вони здобувають в межах поточного курсу та знань, набутих у рамках вивчення інших дисциплін[1]. Крім того, необхідно враховувати, що когнітивні здібності здобувачів освіти першого-другого років навчання суттєво відрізняються від студентів старших курсів.

Дисципліни природничого комплексу вивчаються студентами-медиками на 1-2 курсах. На сьогодні у Буковинському державному медичному університеті викладання дисципліни «Медична та біологічна фізика» та споріднених з нею для студентів різних медичних спеціальностей, як компоненти природничої освіти, побудоване таким чином, щоб забезпечити максимальну міждисциплінарність (навчальна програма, навчальний та навчально-методичний комплекс матеріалів, дидактичні матеріали та ін). Навчальні програми передбачають тісний зв'язок з комплексом дисциплін, пов'язаних з хімією, біологією, гістологією, мікробіологією, фізіологією й ін. та закладення основ для вивчення клінічних дисциплін (радіологія, офтальмологія, фізіотерапія, функціональна діагностика та ін.). При вивченні тем для кожної дисципліни наголошуються акценти використання набутих у рамках дисципліни знань у майбутній професійній діяльності, вибудовуються причинно-наслідкові зв'язки, розв'язуються ситуаційні задачі, проводиться комплекс "дослідження- обробка отриманих результатів" та ін. Вищеперелічене стає фундаментом для можливості ефективного використання методів трансдисциплінарності при вивченні клінічних та інших спеціальних дисциплін на старших курсах для студентів різних медичних напрямків та здобувачів освіти на освітньо-науковому рівні [2]. Крім того, можливість ознайомлення з елементами трансдисциплінарності для здобувачів напрямків медичної освіти при вивченні природничих наук є виконання індивідуальних робіт студентів, робота в рамках студентського наукового гуртка, підготовка та участь у студентських наукових конференціях, олімпіадах та ін.

Отже, дисципліни природничого циклу є невід'ємною частиною розвитку трансдисциплінарності в медичній освіті.

### **Список використаних джерел**

[1] Л. Г. Роша, «Трансдисциплінарний підхід та впровадження нових форм навчання професійної підготовки фахівців патологоанатомічної служби». Вісник Вінницького національного медичного університету ім. М. І. Пирогова, т. 22, № 4, с. 696–699, 2018.

[2] С. М. Стадніченко, «Інтеграція природничих і медичних дисциплін як засіб формування професійної компетентності студентів» Наукові записки. Серія: Педагогічні науки, вип. 2(173), с. 195-200, 2018.

## ВПЛИВ РАДІАЦІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА ЮПІТЕРА НА СУПУТНИКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ОПРОМІНЕННЯ ЇХ ПОВЕРХНІ

Фоміна А.П.<sup>1,2</sup>, Новак О.П.<sup>3</sup>, Холодов Р. І.<sup>3</sup>, Маслов В.І.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Інститут теоретичної фізики ім.М.М.Боголюбова НАН України, Київ, Україна

<sup>2</sup>Університет Париж-Сакле, Орсе, Франція

<sup>3</sup>Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна

<sup>4</sup>ІНЦ Харківський фізико-технічний інститут, Харків, Україна

Досліджено взаємодію іонів магнітосферної плазми Юпітера та його супутників. Плазма магнітосфери планети-гіганта Юпітера є дуже активним середовищем з радіаційними поясами, різними зарядженими частинками та випромінюванням, що постійно впливають на його супутники. Такий вплив є одним з основних джерел зміни їх поверхні та атмосфери. У цій роботі розглянуто вплив магнітосферної плазми на прикладі супутника Ганімеда. Ми використовуємо комп'ютерне моделювання і підхід, заснований на зворотному відстежуванні пробних частинок плазми для моделювання взаємодії супутника Ганімеда з потоком плазми в магнітосфері Юпітера та висипання іонів на поверхні Ганімеда.

Потік магнітосферних частинок постійно впливає на вивітрювання поверхні Ганімеда, на радіоліз поверхневих шарів і на утворення розпорошеної екзосфери супутника [1,2]. Плазма поблизу Ганімеда складається як з теплових (з енергією  $E \leq 10$  кеВ), так і з енергетичних іонів і електронів ( $E \geq 10$  кеВ до 50 МеВ). Енергетична іонна компонента магнітосферної популяції Юпітера в основному складається з іонів  $H^+$ ,  $O^+$ ,  $S^{+++}$ . Іони в діапазоні енергій від 1 кеВ до кількох МеВ мають найбільші потоки, призводять до найбільших обсягів розпилення та роблять основний внесок у поверхневі процеси. Розподіл висипання енергетичних іонів є просторово змінним, залежно від їх властивостей — енергії, типу, стану іонізації, інтенсивності потоку.

В нашому дослідженні ми використовуємо комп'ютерне моделювання із зворотнім відстеженням тестових частинок, для вивчення динаміки іонів для того, щоб змодельовати взаємодію поверхні Ганімеда з потоком плазми в магнітосфері Юпітера та знайти висипання іонів на Ганімед [3]. Ми розраховуємо відсоток іонів, які змогли вийти з магнітосфери Ганімеда та досягти зовнішньої межі для кожної точки на поверхні. Магнітне поле беремо згідно з даними вимірювань Galileo G1, що пролітав поблизу Юпітера та Ганімеда. Його конфігурація враховує фонове магнітне поле планети та внутрішнє магнітне поле супутника.

Було знайдено карти висипання іонів  $H^+$ ,  $O^+$ ,  $S^{+++}$  на поверхні, що відповідають різним енергіям частинок [3]. Розрахунки наведено для іонів з енергіями 1 кеВ, 10 кеВ, 30 кеВ. Кількість іонів що відстежуються під час моделювання  $N_i=50000$ . Відсотки іонів які покинули поверхню супутника та вишли за межі магнітосфери Ганімеда, представлені на картах. На графіках довгота вимірюється від меридіана, зверненого до Юпітера, а широта – від екватора. Таким чином, координати центру (0,0) відповідають напрямку +Y у системі GpHiO (з центром на супутнику).

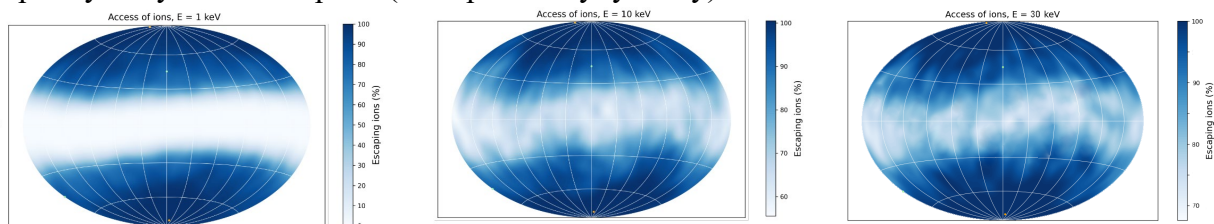


Рис.1. Для прикладу - карти висипання іонів  $O^+$  на поверхні Ганімеда, що відповідають початковим енергіям, рівним 1, 10 і 30 кеВ.

Показано існування екранованої екваторіальної області на Ганімеді. При низьких енергіях частинок магнітосфера супутника може частково захищати поверхню на екваторі від ударних іонів і, таким чином, відхиляти їх до полюсів. В цілому полярні області більш

доступні для впливу частинок, оскільки на полюсах супутника є відкриті силові лінії магнітного поля.

#### **Список використаних джерел**

- [1] J.F.Cooper, et al. Energetic ion and electron irradiation of the icy Galilean satellites, *Icarus*, 149, p.133– 159, 2001.
- [2] M.G.Kivelson, et al. Magnetospheric interactions with satellites, In *Jupiter: The planet, satellites, and magnetosphere*. Cambridge Univ. Press, pp. 513– 536, 2004.
- [3] O.V.Helemelya, A.P.Fomina, O.P.Novak, R.I.Kholodov, Modeling the interaction of Jupiter's magnetospheric plasma ions with satellite, *Probl. of atomic science and technology*, № 4(146), p.117, 2023.

### ***ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ В ОСВІТІ***

***Чечіль Т.Ю., магістрант; Салтикова А.І., к.ф.-м.н, доц.***

*Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Суми, Україна*

На сьогодні, комп'ютер, мобільний телефон, інтернет стали невід'ємною складовою нашого життя. Інформаційно-комунікаційні технології широко використовуються в повсякденному житті та роботі. Без них сьогодні не може існувати освіта [1]. І ось, лише більше року тому в нашому житті з відкриттям доступу до ChatGPT з'явилася нова технологія - штучний інтелект (ШІ). Хоча в дійсності технології штучного інтелекту доступні вже більше 10 років. Слід зауважити, що назва не відповідає дійсності, так як до інтелекту ця технологія поки що не має відношення. Маємо певний набір програм, які виконують різноманітні завдання. Це добре нам знайоме голосове введення тексту, навігація по картам, розпізнання відбитків пальців тощо. В сервісі ChatGPT, який працює на основі великої мовної моделі поєднуються величезний об'єм інформації та відкритий доступ до неї. Він може працювати з текстами, програмними кодами, формулами та числами — створювати відповіді з різних предметних областей, різного формату, розміру, стилю та рівня деталізації. У будь-якому випадку людина має думати, а машина працювати, виконувати поставлені перед нею завдання. Причому чим детальніше поставлене завдання, тим кращий результат отримуємо. Питання використання ШІ в освіті і, взагалі межі його використання, на сьогодні є досить дискусійним. З одного боку учасники освітнього процесу, як учні так і вчителі використовують технології штучного інтелекту для підвищення ефективності навчання. Це може бути як створення текстів, зображень, тестів, анотацій, презентацій тощо, так і, наприклад, аналіз ефективності навчання та пропозиції щодо його покращання. ШІ дає можливість оптимізувати організацію навчального процесу, створювати і корегувати розклад занять тощо. Отже, з позитивного, це персоналізація навчання (підлаштування під кожного учня), реалізація зворотнього зв'язку, автоматизація адміністрування, генерація освітнього контенту, широкі можливості для реалізації дистанційного навчання тощо. До ризиків впровадження ШІ можна віднести відсутність людського спілкування, розповсюдження шкідливого контенту, етичні питання (можливість порушення конфіденційності, авторського права тощо), продукування неправильних даних. Крім цього, слід указати на високу вартість впровадження та потреба в кваліфікованих кадрах з певними навичками. Зауважимо, що хоча ШІ має значний потенціал для покращення процесу навчання, його впровадження вимагає ретельного планування та врахування можливих недоліків та ризиків. Збалансований підхід, який поєднує переваги штучного інтелекту та традиційні цінності, можуть значно підвищити ефективність освітнього процесу та його якісні показники. На сьогодні ми маємо категорію вузький штучний інтелект, який працює під конкретні завдання. Наступним кроком може бути поява загального ШІ, коли комп'ютер зможе виконувати завдання як людина. Отже,

штучний інтелект можна сприймати чи не сприймати, але це об'єктивна реальність і нам з нею жити.

#### Список використаних джерел

[1] Осадчий В.В., Осадча К.П. «Сучасні реалії і тенденції розвитку інформаційно-комунікаційних технологій в освіті». Інформаційні технології і засоби навчання. Том 48, №4, с. 47-56, 2015

### **ЕЛЕКТРОННИЙ МОЗКОВИЙ ШТУРМ ЯК ЗАСІБ РОЗВИТКУ ІНФОРМАЦІЙНО-ЦИФРОВОЇ КОМПІТЕНТНОСТІ УЧНІВ НА УРОКАХ ФІЗИКИ**

**Шищенко І.В.<sup>1</sup>, к.п.н., доц.; Юрченко В.І.<sup>1</sup>, магістрант**

<sup>1</sup> Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка, Суми, Україна

Сучасна дидактика пропонує чимало інтерактивних освітніх методів, які мають достатній вплив на формування інформаційно-цифрової компетентності учнів на засадах НУШ. Однак, класифікаційні підходи до їх визначення залишаються на стадії розробки. Серед інтерактивних методів навчання фізики сучасних учнів методисти вказують метод мозкового штурму.

Метод мозкового штурму був розроблений А. Осборном у 1942 році. Мозковий штурм – це процес інтенсивного обговорення ідей з метою пошуку рішень конкретної проблеми. Метод мозкового штурму можна використовувати для різних видів діяльності, включаючи малі групи, великі групи, команди та індивідуальну роботу. Спираючись на власний педагогічний досвід, ми вважаємо, що груповий мозковий штурм є найкращим способом генерування ідей для груп учнів. Стилі мислення та досвід учнів в академічній групі об'єднуються для отримання бажаних результатів [1].

Існує багато методів (способів) проведення мозкового штурму. Вибір залежить від характеру проблеми, творчого колективу та інших обставин. З 2018 року широкого розповсюдження набув онлайн-мозковий штурм, що проводиться за допомогою цифрових технологій. Цей метод дозволив майже повністю усунути страх оцінювання та висловлення думок, забезпечити анонімність учасників та вирішити різноманітні проблеми, які були притаманні традиційному мозковому штурму. Зокрема, до останніх належить так званий "блок продуктивності". Коли члени групи по черзі представляють свої ідеї, люди можуть передумати, боятися висловлювати свої ідеї публічно або просто забути про них [1].

Методична схема використання «електронного мозкового штурму» така (рис. 1).

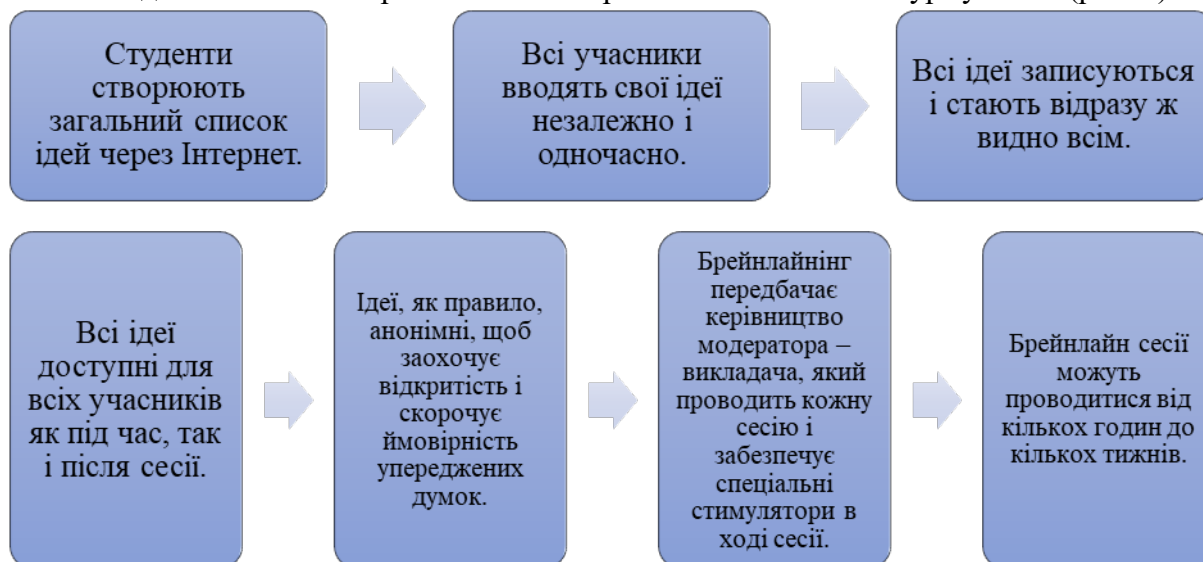


Рис. 1. Схема використання «електронного мозкового штурму» на уроках фізики

«Електронний метод мозкового штурму» може використовуватися на уроках з фізики, наприклад, для обговорення розв'язування задачі: «На Землю від Сонця надходить величезна кількість енергії, а людство продовжує будувати теплові, атомні і гідроелектростанції. Запропонуйте конкретні способи використання сонячної енергії (для обігріву, освітлення, отримання електроенергії)». У результаті були одержані відповіді, які учні закріпили на цифровій інтерактивній дошці, платформі Padlet (<https://uk.padlet.com/dashboard>) (рис. 2) [2].



Рис. 2. Обговорення учнями поставленої задачі за допомогою цифрової платформи

Навчання фізики сучасних дітей у цифрову епоху потребує специфічних підходів та уваги до їхніх особливостей. Зокрема, слід використовувати цифрові технології як інструменти навчання (смартфони, планшети та комп'ютери, навчальні програми, відеоуроки, інтерактивні вправи та онлайн-ресурси), щоб створити цікавий та пізнавальний досвід для дітей, розвивати цифрову грамотність (навчати дітей розрізняти достовірну та недостовірну інформацію в Інтернеті, забезпечувати свою кібербезпеку, розуміти основні принципи використання технологій у безпечний та відповідальний спосіб), заохочувати критичне мислення (навчіть дітей аналізувати інформацію, задавати запитання та виражати свої думки), сприяти творчому розвитку (заохочувати до творчого мислення, експериментів та самовираження за допомогою технологій, дозволити їм розробляти власні проекти та ідеї). Важливо також збалансувати час, який діти проводять перед екранами, з фізичною активністю, соціальними взаємодіями та іншими видами навчання. В освітньому процесі слід враховувати, що кожна дитина є унікальною, і потребує індивідуального підходу до навчання.

Навчання сучасних дітей фізики у цифрову епоху вимагає розуміння та відкритості до нових можливостей та викликів. Важливо створити таке освітнє середовище, де вони зможуть вчитися, розвиватися та розкривати свій потенціал у цифровому світі в безпечний та збалансований спосіб.

#### Список використаних джерел

[1] О.М. Трифонова, Методична система розвитку інформаційно-цифрової компетентності майбутніх фахівців комп'ютерних технологій у навчанні фізики і технічних дисциплін у закладах вищої освіти: монографія, Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2019.

[2] В. М. Стома, «Комп'ютерна підтримка навчання фізики: ретроспективний аналіз» Фізико-математична освіта, вип. 4(14), с. 104-108, 2017.

Наукове видання

**СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ,  
ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ ТА  
МЕТОДИКИ НАВЧАННЯ ФІЗИКИ**

**МАТЕРІАЛИ**

**X Всеукраїнської науково-практичної конференції  
з міжнародною участю (Суми, 15-17 квітня 2024 року)**

(електронне наукове видання)

**ISSN 2521-6996**

**Key title: Sučasni problemi eksperimental'noi, teoretičnoï fiziki ta metodiki  
navčannâ fiziki**

**Abbreviated key title: Sučas. probl. eksp. teor. fiz. metod. navčannâ fiz.**

Відповідальний за випуск: **Лебединський С. О.**  
Комп'ютерний набір і верстка: **Лебединська Ю. С.**