

Національна академія наук України  
Інститут прикладної фізики  
Міністерство освіти і науки України  
Наукове товариство студентів, аспірантів, докторантів та молодих  
учених СумДПУ імені А. С. Макаренка  
Кафедра фізики та методики навчання фізики  
СумДПУ імені А. С. Макаренка



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

*Присвячена 30-річчю незалежності України*

**МАТЕРІАЛИ**  
**VII Всеукраїнської науково-практичної конференції**  
**студентів, молодих учених,**  
**науково-педагогічних працівників та фахівців**  
**з міжнародною участю**

**12-14 квітня 2021 року**  
**м. Суми**

**Національна академія наук України  
Інститут прикладної фізики  
Міністерство освіти і науки України  
Наукове товариство студентів, аспірантів, докторантів та молодих  
учених СумДПУ імені А. С. Макаренка  
Кафедра фізики та методики навчання фізики  
СумДПУ імені А. С. Макаренка**

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

*Присвячена 30-річчю незалежності України*

**Матеріали  
VII Всеукраїнської науково-практичної конференції  
студентів, молодих учених,  
науково-педагогічних працівників та фахівців  
з міжнародною участю**

**(Суми, 12-14 квітня 2021 року)**

За редакцією кандидата фізико-математичних наук, доцента,  
завідувача кафедри фізики та методики навчання фізики О.М. Завражної

Суми  
Сумський державний педагогічний університет імені А.С.Макаренка  
2021

**УДК 53:004(08)**

**М 34**

Рекомендовано вченою радою Сумського державного педагогічного  
університету імені А. С. Макаренка  
(Протокол №11 від 26.04.2021 р.)

**Упорядник:** Завражна О. М., кандидат фізико-математичних наук, доцент,  
завідувач кафедри фізики та методики навчання фізики

**Рецензенти:**

**Холодов Р. І.** – доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник  
Інституту прикладної фізики Національної академії наук України.

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

**М 34** Сучасні проблеми експериментальної, теоретичної фізики та методики навчання  
фізики: матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, молодих  
учених, науково-педагогічних працівників та фахівців з міжнародною участю, присвяченої  
30-річчю незалежності України. м. Суми, 12-14 квітня 2021 р. / за ред. О. М. Завражної –  
Суми: СумДПУ, 2021. – 96 с.

У збірнику подані матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції  
студентів, молодих учених, науково-педагогічних працівників та фахівців з міжнародною  
участю «Сучасні проблеми експериментальної, теоретичної фізики та методики навчання  
фізики», присвяченої 30-річчю незалежності України. 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.

© Завражна О.М., 2021

© СумДПУ, 2021

## Тематичні напрями роботи конференції

1. Квантова теорія поля.
2. Взаємодія іонів та електронів низьких енергій з речовиною.
3. Радіаційне матеріалознавство.
4. Фазовий контраст, біофізика та медицина.
5. Комп'ютерне моделювання фізичних процесів.
6. Питання теорії та методики навчання фізики та нанотехнологій.
7. Інноваційні підходи до навчання фізики в ЗЗСО та ЗВО.
8. Актуальні проблеми освіти та технологій у середній та вищій школі.

### ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Сторіжко В. Ю.** Голова програмного комітету, академік НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, директор Інституту прикладної фізики України.
- Холодов Р. І.** доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, доцент, заступник директора з наукової роботи Інституту прикладної фізики НАН України.
- Ворошило О. І.** кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, учений секретар Інституту прикладної фізики НАН України.
- Пономарьов О. Г.** доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу фізики пучків заряджених частинок Інституту прикладної фізики НАН України.
- Харченко Д. О.** доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу моделювання радіаційних ефектів та мікроструктурних перетворень у конструкційних матеріалах Інституту прикладної фізики НАН України.
- Кульменцьєв О. І.** доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Інституту прикладної фізики НАН України.
- Завражна О. М.** кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри фізики та методики навчання фізики СумДПУ імені А. С. Макаренка.
- Каленик М. В.** кандидат педагогічних наук, доцент, декан фізико-математичного факультету СумДПУ імені А. С. Макаренка.

### ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

- Ворошило О. І.** Голова організаційного комітету, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, учений секретар Інституту прикладної фізики НАН України.
- Завражна О. М.** Співголова організаційного комітету, кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри фізики та методики навчання фізики СумДПУ імені А. С. Макаренка.
- Салтикова А. І.** кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики та методики навчання фізики СумДПУ імені А. С. Макаренка.
- Лебединський С. О.** кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник, голова Ради молодих вчених Інституту прикладної фізики НАН України.
- Лобас О. М.** викладач кафедри фізики та методики навчання фізики СумДПУ імені А. С. Макаренка.
- Салтиков Д. І.** доктор філософії (природничі науки), викладач кафедри фізики та методики навчання фізики СумДПУ імені А. С. Макаренка, представник наукового товариства студентів, аспірантів, докторантів та молодих учених СумДПУ імені А. С. Макаренка.

- Стома В. М.* доктор філософії (професійна освіта), викладач кафедри фізики та методики навчання фізики СумДПУ імені А. С. Макаренка, представник наукового товариства студентів, аспірантів, докторантів та молодих учених СумДПУ імені А. С. Макаренка
- Хелемеля О. В.* кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник Інституту прикладної фізики НАН України.

#### **ПРОГРАМНО-РЕДАКЦІЙНИЙ КОМІТЕТ**

- Завражна О. М.* Голова програмно-редакційного комітету, кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри фізики та методики навчання фізики СумДПУ імені А. С. Макаренка.
- Салтикова А. І.* кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики та методики навчання фізики СумДПУ імені А. С. Макаренка.
- Каленик М. В.* кандидат педагогічних наук, доцент кафедри фізики та методики навчання фізики СумДПУ імені А. С. Макаренка.
- Салтиков Д. І.* доктор філософії (природничі науки), викладач кафедри фізики та методики навчання фізики СумДПУ імені А. С. Макаренка, представник наукового товариства студентів, аспірантів, докторантів та молодих учених СумДПУ імені А. С. Макаренка.
- Стома В. М.* доктор філософії (професійна освіта), викладач кафедри фізики та методики навчання фізики СумДПУ імені А. С. Макаренка, представник наукового товариства студентів, аспірантів, докторантів та молодих учених СумДПУ імені А. С. Макаренка.
- Дедушева І. В.* завідувач навчальної лабораторії кафедри фізики та методики навчання фізики СумДПУ імені А. С. Макаренка.

## ЗМІСТ

Батурін В. А., Карпенко О. Ю., Єрємін С. О., Роєнко О. Ю. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ПЛАЗМОВО-МОДИФІКОВАНИХ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ДО ВАКУУМНИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ПРОБОЇВ .....	8
Батурін В. А., Литвинов П. О., Пустовойтов С. О., Карпенко О. Ю., Роєнко О. Ю. РОЗПОРОШУВАЛЬНЕ ДЖЕРЕЛО ІОНІВ МЕТАЛІВ .....	10
Баштова А. І. ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ $\beta$ -Nb ФАЗИ В БІНАРНИХ СПЛАВАХ Zr-Nb ПІДДАНИХ РАДІАЦІЙНОМУ ОПРОМІНЕННЮ .....	12
Белінський А. О., Соловйов В. М., Татаренко А. О., Слюсаренко М. А. НЕЕКСТЕНСИВНА ПРИРОДА ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ .....	12
Білик В. М. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ РІХЕ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЙНОГО ПРОФІЛЮ В ЗРАЗКАХ Zr СПЛАВУ З ІМПЛАНТОВАНИМ Zr .....	14
Бугай О. М., Білик В. М., Шульженко А. В. ХАРАКТЕРИЗАЦІЯ БРОНЗОВИХ ВИРОБІВ З РОЗКОПОК ЦЕРКВИ СПАСА НА БЕРЕСТОВІ .....	16
Бур'янов О.А., Кваша В.П., Марцьоха А.В., Фам Д.К., Мусієнко О.С. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНАЧИМОСТІ ЗВ'ЯЗКОВОГО АПАРАТУ У СТАБІЛІЗАЦІЇ АКРОМІАЛЬНО-КЛЮЧИЧНОГО СУГЛОБА .....	17
Возний В. І., Пономарьов О. Г., Сайко М. О., Павленко Ю. А. ВИМІРЮВАННЯ ЕМІТТАНСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕННІНГОВСЬКОГО ДЖЕРЕЛА ІОНІВ .....	19
Возний В. І., Пономарьов О. Г. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНДУКТИВНОГО ВИСОКОЧАСТОТНОГО ДЖЕРЕЛА ІОНІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПАКЕТА COMSOL .....	21
Ворона М. І., Денисенко О. І., Лебедь О. А. МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ АНІГЛЯЦІЇ ПОЗИТРОНІВ В КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ РЕАКТОРІВ .....	23
Ворошило О. І., Недорешта В. М. РЕЗОНАНСНЕ НАБЛИЖЕННЯ В КЕД ПРОЦЕСАХ 2-ГО ПОРЯДКУ ЗА СТАЛОЮ ТОНКОЇ СТРУКТУРИ .....	25
Гайда В. Я. ФОРМУВАННЯ РЕФЛЕКСИВНО-АНАЛІТИЧНОГО КОМПОНЕНТА САМООСВІТНЬОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ УЧНІВ НА УРОКАХ ФІЗИКИ .....	26
Гальмаков В. С., Коноз К. О., Пухно С. В. КОМУНІКАТИВНА КОМПЕТЕНТНІСТЬ ЯК СКЛАДОВА ПРОФЕСІОНАЛІЗМУ МАЙБУТНЬОГО ФАХІВЦЯ .....	28
Декарчук С.О. ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ІНТЕРАКТИВНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПОСІБНИКІВ З ФІЗИКИ .....	29
Дяденчук А.Ф. ФОРМУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО МИСЛЕННЯ У МАЙБУТНІХ ЕКОЛОГІВ ПРИ ВИВЧЕННІ ЗАГАЛЬНОГО КУРСУ ФІЗИКИ .....	31
Дяченко М. М., Холодов Р. І. НЕЛІНІЙНІ КОЛЕКТИВНІ ЕФЕКТИ ПРИ ГАЛЬМУВАННІ ЗАРЯДЖЕНОЇ ЧАСТИНКИ В ЗАМАГНІЧЕНІЙ ЕЛЕКТРОННІЙ ПЛАЗМІ .....	32
Ільченко В. Р., Каленик М. В. УЗАГАЛЬНЕННЯ І СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ЗНАТЬ УЧНІВ З ФІЗИКИ .....	33
Коломієць В. М., Шкурят О. І., Кравченко С. М., Юнда А. М. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ НАПИЛЕННЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РОЗПИЛЕННЯ ІМПУЛЬСАМИ ВИСОКОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ВНУТРІШНІЙ ПОВЕРХНІ КАНАЛУ ПОВНОМІРНОГО АРТИЛЕРІЙСЬКОГО СТВОЛА КАЛІБРУ 30 ММ .....	37

Коробко Я. Р., Завражна О. М., Дедушева І. В. ІГРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ НА УРОКАХ ФІЗИКИ.....	39
Крикля С. В., Денисенко О. І. МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЇ АНІГЛЯЦІЇ В ТОЧКОВИХ ДЕФЕКТАХ .....	41
Лебединський С. О., Холодов Р. І. МОДЕЛЮВАННЯ СТРУМУ ПОЛЬОВОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ ЕМІСІЇ З РЕАЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ МЕТАЛУ .....	42
Литвинов П. О., Батурін В. А., Пустовойтов С. О., Росенко О. Ю. ЗБІЛЬШЕННЯ ЕМІСІЙНОЇ ЩІЛЬНОСТІ НЕГАТИВНИХ ІОНІВ З ИПФ-ДЖЕРЕЛА ЗА РАХУНОК СТВОРЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В ОБ'ЄМІ ЕМІСІЙНОЇ ОБЛАСТІ ПЛАЗМИ .....	44
Литвинов П. О., Батурін В. А., Пустовойтов С. О., Росенко О. Ю. ОПТИМІЗАЦІЯ ФІЗИЧНОГО МЕХАНІЗМУ ГЕНЕРАЦІЇ НЕГАТИВНИХ ІОНІВ В ИПФ-ДЖЕРЕЛІ .....	45
Медведовська О. Г. ОГЛЯД ХМАРНИХ СЕРВІСІВ, ПІДТРИМУЮЧИХ СПІЛЬНУ РОБОТУ НАД ДОКУМЕНТОМ У РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ НА ОСНОВІ WEB-SERVICES GOOGLE TRENDS .....	47
Мельник Ю. С. ОСОБЛИВОСТІ ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ МЕХАНІКИ В БАЗОВОМУ КУРСІ ФІЗИКИ .....	49
Могильницький М. В. ФОТОГРАММЕТРИЧНІ ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В НАВЧАЛЬНОМУ ПРОЦЕСІ ВИЩОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ШКОЛИ .....	51
Мусієнко І. І., Холодов Р. І. ВПЛИВ РЕЗОНАНСНИХ УМОВ НА СТРУМ ПОЛЬОВОЇ ЕМІСІЇ З ДВОШАРОВОЇ ПОВЕРХНІ МЕТАЛУ .....	52
Недорешта В. М., Ворошило О. І. РЕЗОНАНСНА КІНЕМАТИКА РОЗСІЯННЯ ЕЛЕКТРОНІВ ТА ФОТОНІВ ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ В СИЛЬНОМУ ЛАЗЕРНОМУ ПОЛІ .....	55
Новак О. П. ІОНІЗАЦІЯ К-ОБОЛОНКИ ВАЖКОГО ІОНА КОРОТКИМ ЛАЗЕРНИМ ІМПУЛЬСОМ .....	57
Обухов О. А. ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ОБТІКАННЯ РЕАКТИВНИХ СНАРЯДІВ ПОВІТРЯНИМ ПОТОКОМ .....	59
Овчаренко А. Ю., Лебедь О. А. АНАЛІТИЧНИЙ ОПИС ФОРМУВАННЯ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ФАЗОКОНТРАСТНОГО ЗОБРАЖЕННЯ .....	59
Овчаренко Ю. М. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЛАВІВ Fe-Cu, Fe-Ni ТА Fe-Cu-Ni МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНОЇ ДИНАМІКИ .....	61
Острик В. І. МЕТОД ПРОДОВЖЕННЯ КРАЙОВИХ УМОВ У ЗАДАЧАХ ТЕОРІЇ ПРУЖНОСТІ .....	63
Подгорнова Д. Я., Сусь Б. А. РУХ ЧАСТИНКИ З ВЕЛИКОЮ ШВИДКІСТЮ І ХВИЛЬОВИЙ ПРОЦЕС .....	64
Положій Г. Є., Ребров В. А., Колінько С. В., Саливон В. Ф., Пономарьов О. Г., Калінкевич О. М., Калінкевич О. В., Зінченко Є. І. ВДОСКОНАЛЕННЯ КАНАЛУ ПРОТОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ЛІТОГРАФІЇ НА АПК “СОКОЛ” В ІНСТИТУТІ ПРИКЛАДНОЇ ФІЗИКИ НАН УКРАЇНИ.....	66
Пономарьов О. Г., Садовий С. О., Возний В. І. МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИКИ ПУЧКА В ІОННОМ ІНЖЕКТОРІ ДЛЯ КОМПАКТНОГО ЯДЕРНОГО МІКРОЗОНДУ .....	67

Ребров В. А., Колінько С. В., Саливон В. Ф., Пономарьов О. Г. КАНАЛ ПРОТОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ЛІТОГРАФІЇ .....	68
Сайко М. О., Рідченко С. О., Ігнатенко С. М., Марійчук О. В. ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ РЕАЛІЗАЦІЇ УНІВЕРСАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ НАУКОВО-МІСТКИХ ПРОЦЕСІВ НА ПРИКЛАДІ ВАКУУМНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РОЗПИЛЕННЯ .....	69
Салтиков Д. І., Яременко Я. В., Міщенко Д. К. ДЕЯКІ ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ СУЧАСНОЇ ФІЗИКИ В ШКІЛЬНОМУ КУРСІ.....	70
Салтикова А. І., Лобас О. М., Чепурко І. О. ПИТАННЯ РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ У ШКІЛЬНОМУ КУРСІ ФІЗИКИ.....	73
Сергієнко Л. Г. ДИДАКТИЧНІ КРИТЕРІЇ УПРАВЛІННЯ УСПІШНІСТЮ СТУДЕНТІВ .....	74
Скороход Р. В., Коропов О. В. МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ДИСЛОКАЦІЙНОЇ ПІДСИСТЕМИ НА ЕФЕКТИ РАДІАЦІЙНО-ІНДУКОВАНОЇ СЕГРЕГАЦІЇ В ТРИКОМПОНЕНТНОМУ СПЛАВІ Fe-20%Cr-8%Ni .....	76
Стародуб С. С., Лебедь О. А. АКТУАЛЬНІ КОМПАКТНІ ДЖЕРЕЛА РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	78
Тилик С. В., Кузьменко Г. М. ЕЛЕМЕНТИ ІСТОРИЗМУ ЯК ЗАСІБ РОЗВИТКУ ІНТЕРЕСУ УЧНІВ ДО ФІЗИКИ.....	79
Ткач В. С. ОСОБЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ДИСТАНЦІЙНОЇ ФОРМИ НАВЧАННЯ В КПІ ІМ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО .....	81
Трофименко Я. В., Хелемеля О. В., Калінкевич О. В., Калінкевич О. М., Данильченко С. М. ВПЛИВ НИЗЬКОІНТЕНСИВНОГО РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА МЕРИСТЕМУ КІНЧИКІВ КОРЕНІВ <i>ALLIUM SERA</i> ....	83
Трофименко Я. В., Хелемеля О. В., Калінкевич О. В., Калінкевич О. М., Данильченко С. М., Скляр А. М. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НИЗЬКОІНТЕНСИВНОГО РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ ТА ДЕКОРАТИВНІ КУЛЬТУРИ .....	84
Хелемеля О. В. УРАХУВАННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЗНАКУ ЗАРЯДУ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ ВАЖКОЇ ЗАРЯДЖЕНОЇ ЧАСТИНКИ .....	87
Шуліпа Р. О., Павленко Ю. А., Возний В. І. ПРИЛАД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЕМІТТАНСУ ПУЧКА ПРОТОНІВ НА ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ «СОКІЛ» .....	88
Bystrik Yu. S., Denisov S. LIMITING DISTRIBUTION FOR THE XY-MODEL OF BALLISTIC LÉVY WALKS .....	89
Kul'ment'ev A. I. EXCHANGE OF INFORMATION BETWEEN ADJACENT LEVELS IN MULTI-LEVEL COMPUTER SIMULATION.....	90
Білик В.М., Калінкевич О.В., Калінкевич О.М., Данильченко С.М. РІХЕ-АНАЛІЗ МАГНІТНИХ СОРБЕНТІВ НА ОСНОВІ ХІТОЗАНУ ТА МАГНЕТИТУ .....	92
Калінкевич О. В., Калінкевич О. М., Зінченко Є. І., Чіванов В. Д., Данильченко С. М. ДОСЛІДЖЕННЯ НАКОПИЧЕННЯ ВОДНЮ В МЕДИЧНИХ ІМПЛАНТАТАХ З Ti-Zr СПЛАВІВ З МОДИФІКОВАНОЮ ПОВЕРХНЕЮ ЗА УМОВ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО НАВОДНЕННЯ.....	94



**Батурін В. А.**  
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,  
**Карпенко О. Ю.**  
молодший науковий співробітник,  
**Єрьомін С. О.**  
кандидат фізико-математичних наук,  
**Роснко О. Ю.**  
молодший науковий співробітник,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
*baturin49@gmail.com*

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ПЛАЗМОВО- МОДИФІКОВАНИХ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ДО ВАКУУМНИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ПРОБОЇВ**

В Європейському Центрі Ядерних Досліджень (CERN) проектується компактний лінійний електрон-позитронний колайдер (Compact Linear Collider - CLIC) в якому планується в системі центра мас досягти енергії  $\sim 4,3$  TeV. В високочастотних структурах цього колайдера заплановано досягти темп прискорення на рівні 100MV/m, при цьому величина електричних полів на поверхні прискорюючих структур з міді досягає величини більше 200 MV/m. В таких полях виникають вакуумні пробої, які призводять до порушення умов прискорення пучка, та пошкоджують прискорюючі структури.

Для підвищення стійкості конструкційних матеріалів (міді) прискорюючих структур колайдеру CLIC, в ІПФ НАН України запропоновано провести іонно-променевою та плазмовою модифікацію поверхневих шарів цих матеріалів. Дослідження фізичних факторів що впливають на виникнення високо-вакуумного електричного пробою проводилися на високовольтному стенді в умовах безмасляного високого вакууму (не гірше  $10^{-7}$  Pa. Система електроживлення дозволяє створювати та прецизійно регулювати між елементами розрядної системи градієнти електричних полів до 500 MV/m. Електроди розрядного проміжку у вакуумній камері мають так звану конфігурацію «tip-plane» (наконечник-площина). У такій конфігурації плоский досліджуваний зразок, закріплений в спеціальному тримачі, є катодом. Катод підключений до джерела високої напруги негативної полярності. Анодом є мідний стрижень з заокругленим торцем. Зазор між катодом і анодом може мінятися в діапазоні 10 – 100  $\mu\text{m}$ . Катодні диски були виготовлені з міді з низьким вмістом домішок. Частина мідних зразків була модифікована методами плазмової та іонно-променевої обробки. Метою експериментів було дослідження впливу модифікації поверхні на величину напруги пробою. Плазмова та іонно-променевою модифікація зразків проводилася на установках ІПФ НАН України [2,3,4].

В кожному експерименті для порівняння стійкості до пробоїв модифікованої поверхні зразків по відношенню до не модифікованої використовувалися такі критерії як напруга, при якій виникає перед пробійний струм, напруга, при якому виникають мікро-пробої і напруга остаточного пробою. Кожен зразок був поділений на дві частини, одна була піддана модифікації, а інша ні [5]. Ключовими в даних дослідженнях являються не абсолютні значення напруги пробою, а її значення відносно не модифікованої поверхні зразків.

Дослідження показали, що покриття міді тонкими плівками із нітридів тугоплавких металів (MoN, W<sub>2</sub>N) та TiN, а також деякі оксидні покриття з високим значенням роботи виходу електрона (наприклад MoO) підвищують стійкість до високо вакуумних пробоїв на 20 – 25 %, в порівнянні із без кисневою міддю. Покриття міді напівпровідниковими плівками ZnO також підвищує на 20% стійкість до пробоїв.

Покриття міді тонкими плівками (товщиною сотні нм) металів, таких як Al, Ni, Ti, Mo, W, також підвищують значення напруги пробоїв на 10 ÷ 25 % відносно чистої міді [6].

Експериментально показано, що текстура плівкового покриття суттєво впливає на його стійкість до пробоїв. Так дослідження мідних зразків з покриттям плівками TiN показали, що формування в цих плівках текстури з переважною орієнтацією (111) призводить до зменшення темного електронного струму та підвищення величини напруги пробую [5].

Плівкам TiN з текстурою (111) відповідають найнижчі значення енергії деформації, що пов'язано з анізотропією модуля Юнга. Такі площини формуються перпендикулярно напрямку росту всієї системи в цілому, що призводить до мінімізації повної енергії при зростанні плівки. Поява в плівках іншої текстури (200), паралельної поверхні росту, при одночасному зменшенні інтенсивності піку (111) погіршує стійкість плівок нітриду титану до пробоїв, в порівнянні з (111) текстурованими плівками.

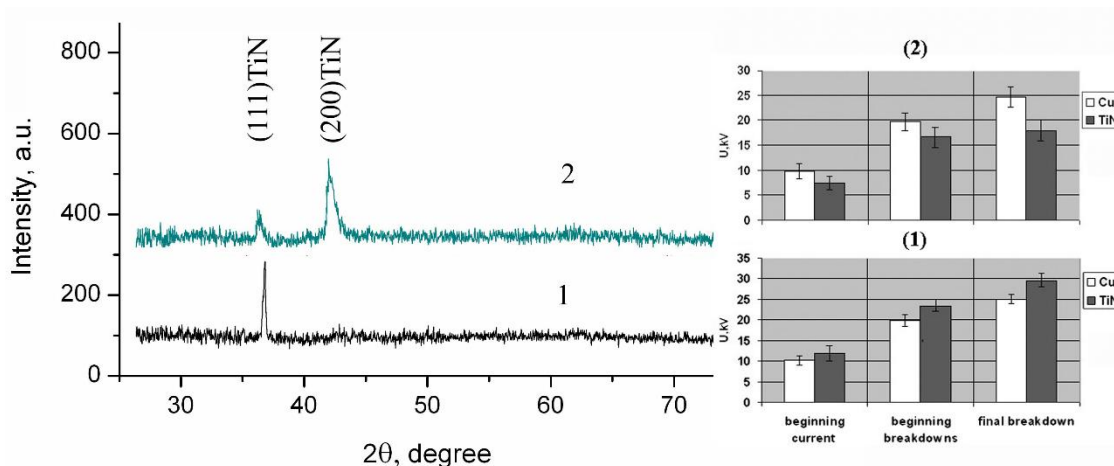


Рис. 1. Результати вимірювань мідних зразків з плівками TiN на стійкість до пробоїв, та дифракційні спектри плівок: 1 - плівки TiN мають кращу стійкість до пробоїв по відношенню до міді; 2 - зразки з погіршенням параметрів пробую на плівках TiN.

Покриття міді плівкою TiN (текстура 111) та додаткове опромінення іонами аргону з енергією  $\sim 300$  keV та дозою  $4 \times 10^{17}$  cm<sup>-2</sup> підвищують напругу високовольтного пробую майже на 35% в порівнянні з чистою міддю.

#### Список використаних джерел

1. Baturin V.A., Karpenko O.Yu., Profatilova Ia.V., Pustovoitov S.O., Mirosnichenko V.I. The experimental setup for high voltage breakdown studies in the high vacuum. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Electronics and New Methods of Acceleration"*. 2015. № 4. p. 294-297.
2. Popovych V.I., Baturin V.A., Karpenko O.Y., Lashkarov G.V. Effect of argon deposition pressure on the properties of aluminum-doped ZnO films deposited layer-by-layer using magnetron sputtering. *Ukr. J. Phys.* 2016. Vol. 61, No. 4. P. 334-339.
3. Батурич В.А., Карпенко А.Ю., Кирик Г.В., Мирошниченко В.И. Установка для нанесення покриттів методом атомно-іонного распылення матеріалів. *Наука та інновації*. 2012. Т. 8, № 3. С. 5-11.
4. Baturin V.A., Yeryomin S.A., Pustovoitov S.A. et al. Generation and Formation of Metal Ion Beams on High-Dose Ion Implanter. *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Physics of Radiation Damage and Radiation Material Science»*. 2015, № 2 (96). p.204 – 209.
5. Baturin V.A., Karpenko A.Yu., Yeryomin S.A. Development and Experimental Studies of Methods for increasing the stability of materials of accelerating structures to high vacuum electrical discharge. *BAHT*. 2019. №6 (124) С.23 – 26.
6. Baturin V.A., Karpenko A.Yu., Storizhko V.E., Shutko V.A. Investigation of Coper Samples with Ion-Plasma treatment on High Voltage Breakdowns. *BAHT*. 2018. №4. (116) с.298 – 301.

**Батурін В. А.**  
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,  
**Литвинов П. О.**  
кандидат технічних наук,  
**Пустовойтов С. О.**  
молодший науковий співробітник,  
**Карпенко О. Ю.**  
молодший науковий співробітник,  
**Роєнко О. Ю.**  
молодший науковий співробітник,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
*baturin49@gmail.com*

## **РОЗПОРОШУВАЛЬНЕ ДЖЕРЕЛО ІОНІВ МЕТАЛІВ**

Для розробки приладів нічного бачення актуальним є створення технологічного циклу виготовлення приймачів інфрачервоного випромінювання. Основним матеріалом для виготовлення ПЧ –фотоприймачів є антимонід індію InSb, в який для формування р-п переходів необхідно імпантувати іони берилію  $Be^+$ . При розробці такої технології важливим є створення високоефективного джерела іонів берилію, та його впровадження в іонний імплантер.

Берилій проявляє як металеві, так і неметалеві властивості. За хімічними властивостями він близький до алюмінію.

Прискорення іонів  $Be^+$  виявилось досить складною проблемою з кількох причин: берилій надзвичайно токсичний, не має газоподібних сполук, покриття сполуками берилію високовольтних електродів знижує електричну міцність і т.п.

Берилію, властиві мала щільності, висока температура плавлення ( $1287^\circ C$ ) та висока питома міцність. Питома міцність берилію при високих температурах ( $400-500^\circ C$ ) вище питомої міцності сталей і тугоплавких металів [1].

В даний час існує ряд способів отримання іонних пучків елементів у твердій фазі [2,3]. Але, враховуючи наведені вище властивості берилію, нами було прийняте рішення для отримання парів берилію в іонному джерелі використати метод іонно-плазмового розпилення мішені з металевого берилію. Цей спосіб особливо ефективний у разі, коли необхідно генерувати іони металів, для яких тиск парів  $\sim 1$  Па досягається при температурі понад  $1000^\circ C$

Також, враховуючи на велику токсичність берилію та на даний час відсутність в Інституті прикладної фізики НАН України дозволу на роботи із сполуками берилію, прийнято рішення відпрацьовувати конструкцію та режими роботи іонного джерела на таких металах як титан та алюміній.

Для генерації та формування прискореного пучка іонів металів розроблено джерело розпилювального типу на основі розряду із осцилюючими електронами в магнітному полі (пеннінгівський розряд). Джерело на основі такого розряду (джерело Пеннінга) є простим та надійним. На рисунку 1 схематично показано джерело з порожнистим катодом.

Для формування магнітного поля використано кільцевий Nd-Fe-B магніт що розташований навколо циліндричних катоду 2 та аноду 6 і створює осьове магнітне поле, силові лінії якого сконцентровані між порожнистим катодом та антикатодом 7, який є

емісійним електродом. Плазма підпалюється на буферному газі Ag який подається в порожнистий катод 2. Осцилюючий електронний пучок в повздовжньому магнітному полі між катодом та антикатодом ефективно іонізує буферний газ, генеруючи щільну аргонову та металеву плазму. Парова фаза робочого металу в іонному джерелі створюється шляхом розпорощення вставки в антикатоді 7 іонною компонентою аргонної плазми.

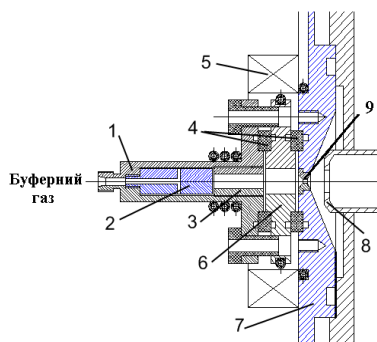


Рис. 1. Джерело іонів металів: 1 – корпус, 2 – магнітопровід, 3 – порожнистий катод, 4 – ізолятори, 5 – магніт, 6 – анод, 7 – антикатод, 8 – екстрагуючий електрод, 9 – вставка що розпилюється.

Дослідження розрядних та емісійних характеристик джерела проводилися на іонному імплантері ІПФ НАН України “Везувій – 5». Розряд підпалювався в буферному робочому газі Ar. Параметри роботи джерела: тиск в вакуумній камері  $4 \cdot 10^{-3}$  Па, розрядний струм – 0,1 - 0,4 А, напруга на розряді 320 В, енергія екстрагованого пучка 30 кеВ, розпилювальні вставки – титан та алюміній. Струм іонного пучка, після магнітної сепарації, вимірювався циліндром Фарадея в приймальній камері іонного імплантера.

Виміряні в цих умовах залежності величин струмів іонів  $Al^+$  та  $Ar^+$  від струму розряду, при різних тисках буферного газу в розрядній комірці показано на рисунку 2.

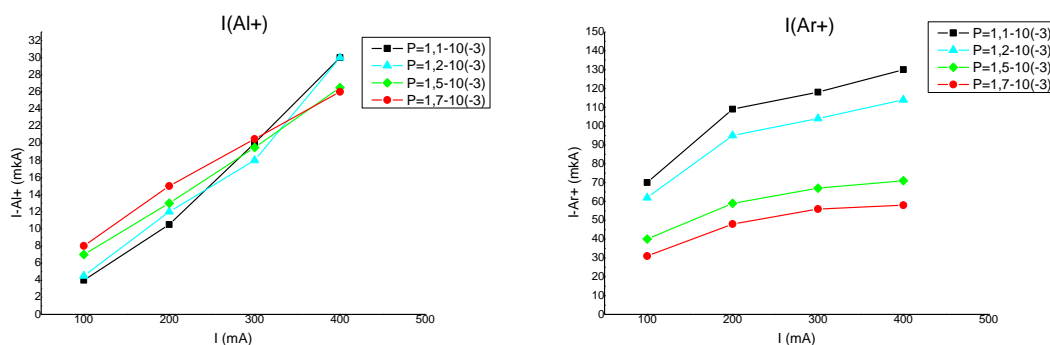


Рис.2. Залежність іонного струму в приймальній камері імплантера від розрядного струму при різних тисках буферного газу.

Аналогічні залежності одержані і у випадку генерації іонів  $Ti^+$ .

#### Список використаних джерел

1. Фридляндер И.Н., Яценко Л.П. и др. Бериллий – материал современной техники. М. Металлургия. 1992. 128 с.
2. Handbook of Ion Sources / Ed. Wolf B. CRC Press Inc., 1995. 544p.
3. Brown I. G. The Physics and Technology of Ion Sources. Weinheim: Wiley, 2004. 379 p.

**Баштова А. І.**  
кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
*anna29bashtova@gmail.com*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ $\beta$ -НЬ ФАЗИ В БІНАРНИХ СПЛАВАХ Zr-Nb ПІДДАНИХ РАДІАЦІЙНОМУ ОПРОМІНЕННЮ**

Робота присвячена вивченню стійкості преципітатів  $\beta$ -фази Ніобію в системах Zr-Nb підданих нейтронному опроміненню. Дослідження проводилось з використанням методу фазового поля, що узагальнений урахуванням динаміки точкових дефектів, їхніх стоків та дислокацій невідповідності. Детально розглядаються локальний розподіл концентрації Nb, концентрації вакансій та густина дислокацій невідповідності на етапах підготовки зразка та його опромінення при різних швидкостях набору дози та температурах. Динаміка та статистика випадіння преципітатів  $\beta$ -Ніобію вивчаються та аналізуються в умовах опромінення нейтронами при 550K та 600K, а також швидкостях набору дози  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  з.н.а./с. Показано, що домени  $\beta$ -Ніобію повільно ростуть за сценарієм Оствальдівського визрівання під час опромінення до 2нм зі зменшенням їх чисельної густини за рахунок виникнення точкових дефектів та упорядкування дислокацій невідповідності. Визначено, що при дозах до (2-3)з.н.а. балістичне перемішування атомів призводить до розчинення преципітатів, тоді як при підвищених дозах дифузійні процеси переважають атермічне атомове перемішування, що призводить до зростання преципітатів. Також показано, що дислокаційні петлі с-типу впливають на динаміку росту розміру доменів  $\beta$ -Ніобію. Проведена оцінка зміцнення, що відбулось під впливом радіації. Отримані в роботі результати підтверджуються експериментальними даними.

**Бєлінський А. О.**  
студент, спеціальність «014 Середня освіта (Інформатика)»,  
**Соловійов В. М.**  
доктор фізико-математичних наук, професор,  
**Татаренко А. О.**  
студент, спеціальність «014 Середня освіта (Фізика)»,  
**Слюсаренко М. А.**  
кандидат педагогічних наук, доцент,  
Криворізький державний педагогічний університет,  
м. Кривий Ріг, Україна  
*krivogame@gmail.com*

## **НЕЕКСТЕНСИВНА ПРИРОДА ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ**

Відкриття гравітаційних хвиль (gravitational waves – GW) [1] є одним із найбільш видатних подій у фізиці за останні десятиліття. Будучи сигналом, що продукується складними системами, GW проявляють нетривіальні властивості, зокрема, ентропію.

Натхненний концепцією мультифрактального аналізу, Константіно Цалліс виявив, що ентропія Больцмана-Гіббса  $S_{BG} = -k_B \sum_{i=1}^W p_i \ln p_i$  є неприйнятною для багатьох видів складних систем, оскільки статистична теорія Больцмана-Гіббса (БГ) припускає їх ергодичність, але вони їй не відповідають.

Тому, у 1988 році Цалліс висунув концепцію неекстенсивної термодинаміки, де новий вид ентропії [2, 3] приймає вигляд  $S_q = -k_B(1-q)^{-1}(1 - \sum_i p_i^q)$  через заміну експоненти  $q$ -експонентою  $e_q(x) = [1 + (1-q)x]^{1/(1-q)}$  та натурального логарифму  $q$ -логарифмом  $\ln_q(x) = (1-q)^{-1}(x^{1-q} - 1)$ .

Характеристичний ентропійний показник  $q$  тісно пов'язаний із мікроскопічною динамікою і характеризує ступінь кореляцій у системі. Із  $q \rightarrow 1$ , окремі структурні елементи системи стають більш незалежними один від одного та  $q$ -ентропія Цалліса  $S_q$  збігається до ентропії  $S_{BG}$ .

Там де традиційна статистична механіка не працює, неекстенсивна теоретична концепція може бути застосована для дослідження множини різних нерівноважних систем: космічних променів та зірок, динаміки плазми і атмосфери; серця та мозку, фінансових активів та економічних показників.

Основною метою нашої роботи є аналіз динаміки гравітаційних хвиль у контексті неекстенсивного формалізму. У якості прикладу ми взяли дані гравітаційної хвилі GW150914 після фільтрації шуму (<https://www.ligo.org/detections/GW150914.php>). Для порівняння використовується часовий ряд аналогічної довжини для сигналу землетрусу (earthquake – EQ) [4]. Результати представлені на рисунку. Верхня частина візуалізує власне досліджувані хвилі, а нижня – функції розподілу нормалізованих сигналів та значення параметра неекстенсивності.

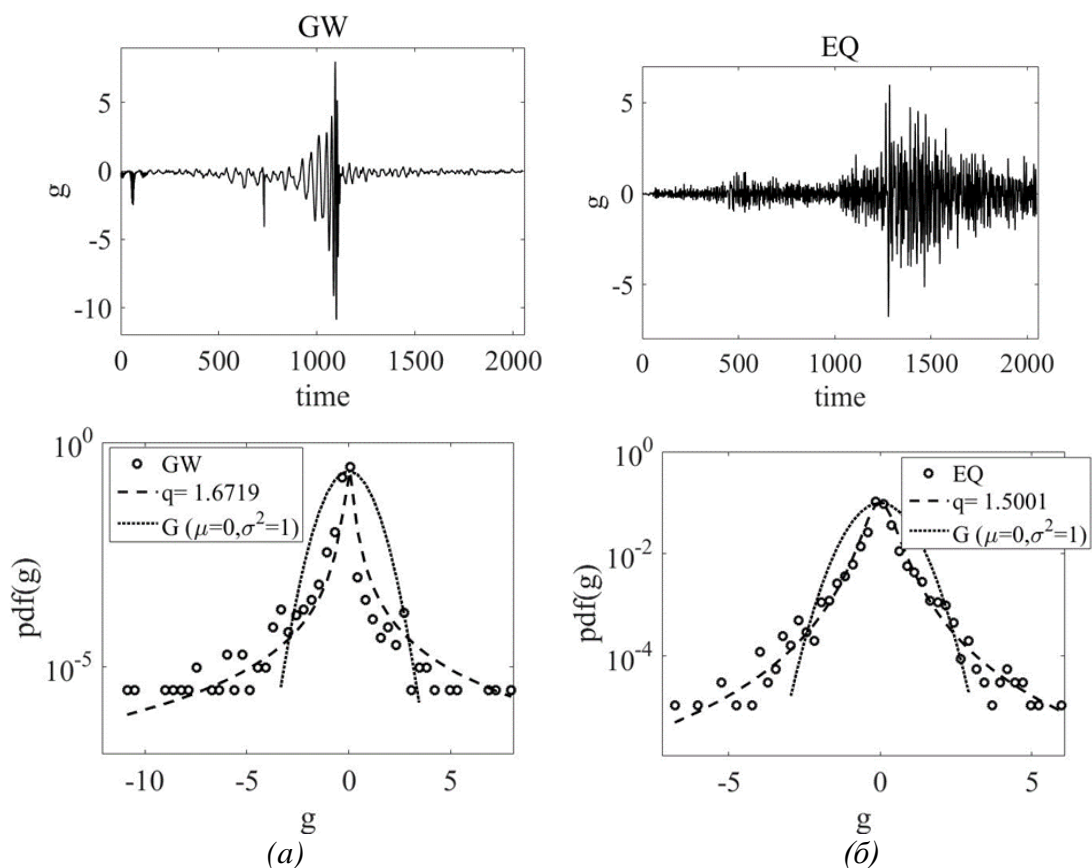


Рис. Порівняння функцій розподілу для сигналів GW (а) та EQ (б) із розподілом Гауса (G). Окрім цього, вказані параметри неекстенсивності  $q$

Видно, що відповідні сигнали не відповідають нормальному розподілу і характеризуються довгими хвостами, а отримані значення  $q > 1$  підтверджують неекстенсивну термодинаміку гравітаційних об'єктів, що генерують GW [5]. В подальшому ми плануємо провести комплексні дослідження триплету Цалліса [3] на наявному сімействі GW.

#### Список використаних джерел

1. Abbott, B.P. et al. (2016). Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Phys. Rev. Lett.*, **116**, 061102. doi: 10.1103/physrevlett.116.061102
2. Gazeau, J.P. & Tsallis, C. (2019). Möbius Transforms, Cycles and q-triplets in Statistical Mechanics. *Entropy* 2019, **21**, 1155. doi: 10.3390/e21121155
3. Pavlos, G.P. et al. (2014). Universality of non-extensive Tsallis statistics and time series analysis: Theory and applications. *Physica A*, **395**, 58-95. doi: 10.1016/j.physa.2013.08.026
4. Fulcher, B.D., Little, M.A. & Nick, S. (2013). Jones Highly comparative time-series analysis: The empirical structure of time series and their methods. *J. R. Soc. Interface*, **10** (83), 20130048. doi: 10.1098/rsif.2013.0048
5. Shalaby, A.G., Oikonomou, V.K., Gamal G.L. & Nashed, G.G.L. (2021). Non-Extensive Thermodynamics Effects in the Cosmology off f(T) Gravity. *Symmetry*, **13**, 75. doi: 10.3390/sym13010075

**Білик В. М.**

молодший науковий співробітник,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
*v.m.bilyk.sumy@gmail.com*

### ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ PIXE ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЙНОГО ПРОФІЛЮ В ЗРАЗКАХ Zr СПЛАВУ З ІМПЛАНТОВАНИМ Zr

Робота присвячена застосуванню методу PIXE до дослідження явища перерозподілу концентрації компонентів цирконієвого сплаву під дією опромінення важкими іонами. Основна ціль роботи, на основі методу PIXE, розрахувати концентраційні профілі для цирконієвих сплавів що піддавались опроміненню важкими іонами. Зокрема в даній роботі представлено дослідження Zr сплаву з імплантацією Zr.

Ідея побудови концентраційних профілів методом PIXE описана в [1, 2] та отримала подальший розвиток та застосування [3-7]. Щоб отримати концентраційний профіль методом PIXE необхідно проводити виміри для різних початкових енергій протонів, або проводити виміри для різних кутів між нормаллю до поверхні зразка та протонним пучком. Як в першому так і в другому випадку можна досягти різних максимальних глибин аналізу елементного складу.

Була підготовлена серія зразків цирконієвого сплаву марки Zr-4 та Zr-1. Підготовка полягала у опроміненні зразків до різних доз, зокрема в роботі використовувались зразки з дозою опромінення 50 дра, шляхом імплантації в зразок іонів цирконію з енергією 300 keV. Опромінення відбувалось за допомогою «Високодозного іонного імплантора».

Для проведення профілювання пучок протонів бомбардував мішень під кутом  $70^\circ$  по відношенню нормалі до поверхні зразка (Рис. 1). Утворене рентгенівське випромінювання реєструвалось за допомогою напівпровідникового детектора, розташованого під кутом в  $45^\circ$  до напрямку пучка і відповідно  $25^\circ$  відносно нормалі до поверхні зразка.

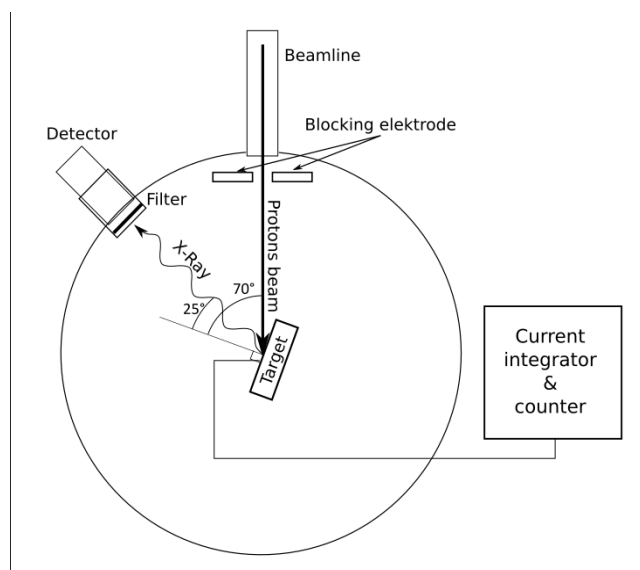


Рис. 1. Схематичний вид експерименту.

Для отримання профілів було проведено сканування по енергіям в діапазоні від 600 до 1080 keV з кроком в 10 keV. Враховуючи кут падіння протонів на поверхню зразка, поступове збільшення енергії пучка збільшувало товщину аналізованого шару від 1,686  $\mu\text{m}$  до 3,96  $\mu\text{m}$ .

В результаті роботи розраховані концентраційні профілі для сплавів цирконію Zr-1 та Zr-4 з імплантацією іонами Zr до дози в 50 дпа.

#### Список використаних джерел

1. F.W. Reuter and H.P. Smith. Full-range solution for the measurement of thin-film surface densities with proton-excited x rays. *J. Appl. Phys.* 43. 1972. 4228.
2. W. Pabst, Depth profile determination by ion-induced X-ray spectroscopy. *Nucl. Instr. and Meth.* 120. 1974. 543.
3. M. Jaksik, M. Vajic, S. Fazinic, D. Rendic, T. Tadit and V. Valkovic, PIXE depth profiling. *Nucl. Instr. and Meth.* B40/41. 1989. P. 643-645.
4. P. Midy, I. Brissaud. Application of a new algorithm to depth profiling by PIXE. *Nucl. Instr. and Meth.* B 103. 1995. P.489-493.
5. J. Miranda, J. Rickards, R. Trejo-Luna. PIXE Depth Profiling Using Variation of Detection Angle. *Nucl. Instr. and Meth.* B 249. 2006. P. 394-396.
6. Z. Smit, M. Holc. Differential PIXE measurements of thin metal layers. *Nucl. Instr. and Meth.* B 219-220. 2004. P.524-529.
7. Z. Smit, M. Ursic, P. Pelicon, T. Trcek-Pecak, B. Seme, A. Smrekar, I. Langus, I. Nemecek, K. Kavkler. Concentration profiles in paint layers studied by differential PIXE. *Nucl. Instr. and Meth.* B 266. 2008. P.2047-2059.



**Бугай О. М.**  
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,  
**Білик В. М.**  
молодший науковий співробітник,  
**Шульженко А. В.**  
молодший науковий співробітник,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
*alex.buhay@gmail.com*

## ХАРАКТЕРИЗАЦІЯ БРОНЗОВИХ ВИРОБІВ З РОЗКОПОК ЦЕРКВИ СПАСА НА БЕРЕСТОВІ

Ядерно-фізичним методом PIXE (Particle-induced X-ray emission) були проаналізовані десять зразків, знайдених при розкопках Церкви Спаса на Берестові у 2018-2019 рр. Серед цих зразків були 7 хрестів (один з них – хрест-енколпійон), вісімкоподібна бляшка, деталь замка у вигляді коника та фрагмент кинжалоподібної книжкової застібки.

Матеріалами, з яких створені всі знахідки, є сплави на основі міді (рис.1). Зразок 60 створений з класичної олов'яної бронзи. Три зразки, а саме хрести 54, 55 та 61 є багатокомпонентними, що містять цинк, олово та свинець (2 - 8 мас. %). Такі багатокомпонентні сплави з цинком використовували для лиття хрестів з подальшим доопрацюванням. Ці сплави мають високі ливарні якості, наявність цинку знижує газову пористість і надає литтю щільну гладку поверхню. Такі сплави добре обробляються після лиття в холодному стані. Хрест 59 зроблений зі поліметалевого сплаву Cu-Sn-Pb, в якому домінує олово. Зі сплаву Cu-Sn-Pb, але в якому близькі концентрації міді та олова, відлитий і хрест 63.

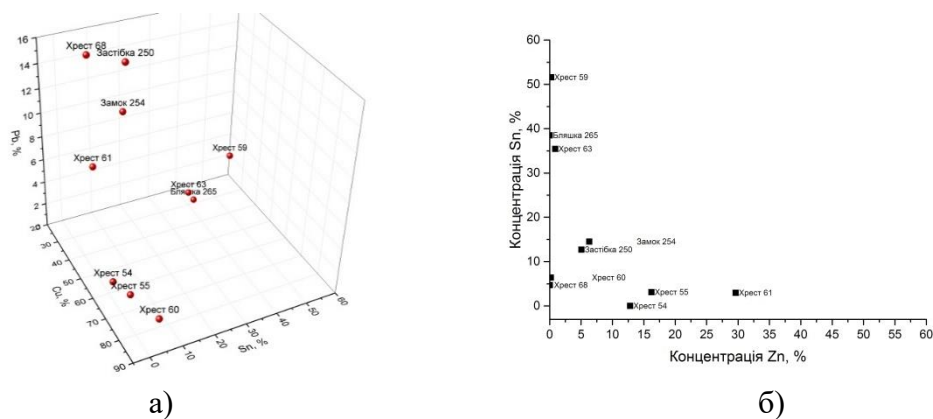


Рис. 1. Вміст олова, свинцю (а) та цинку (б) в сплавах міді зразків, знайдених при розкопках Церкви Спаса на Берестові у 2018-2019 рр.

За виключенням зразків 54, 68 і 265 у виробках міститься миш'як, але це домішка, яка потрапила мимовільно, можливо із-за використання бронзового лому. Хрест 61 містить слідові кількості срібла.

Вісімкоподібна бляшка відлита з поліметалевого сплаву Cu-Sn-Pb. Перший аналіз продемонстрував, що в зразку близькі концентрації міді та олова. Результати аналізу також показали високу концентрація фосфору. Було висунуто припущення, що окрім стандартних схем корозії бронзових зразків з формуванням хлоридів та сульфатів, деякі зразки кородували з формуванням сполук фосфору. Для того, щоб перевірити, що фосфор знаходиться в патині, а значить брав участь у її формуванні, були проведені дослідження, при яких механічно та за допомогою розчинників знімалися покриття та патина та проводився елементний аналіз. Результати представлені на рис.2. Результати показують, що концентрація фосфору знижується при збільшенні концентрації міді. Це призводить до

змін в співвідношенні основних металів сплаву. І це говорить, що як і при корозії з формуванням хлоридів та сульфатів, сильніше вражається основний метал – мідь. Власний досвід та літературні дані свідчать, що схема корозії бронзи через сполуки фосфору зустрічаються нечасто, і вважається, що це характерно для поховань [1].

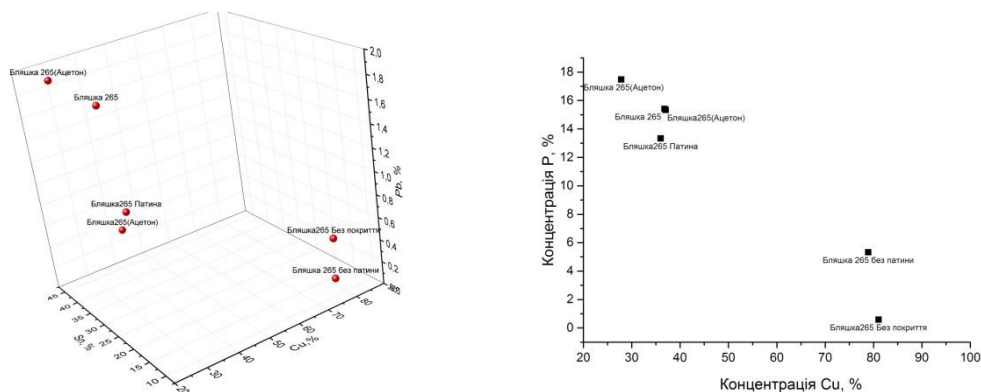


Рис.2. Вміст олова, свинцю та фосфору в сплаві бляшки, знайденої при розкопках Церкви Спаса на Берестові у 2018-2019 рр.

#### Список використаних джерел

1. Xiaopan Fan, Ian C. Freestone. Occurrence of phosphatic corrosion products on bronze swords of the Warring States period buried at Lijiaba site in Chongqing, China Herit Sci (2017) 5:48.

<sup>1</sup>Бур'янов О.А.

доктор медичних наук, професор,

<sup>1</sup>Кваша В.П.

доктор медичних наук, професор,

<sup>1</sup>Національний медичний університет імені О. О.Богомольця

Марцьоха А.В.

лікар ортопед-травматолог,

<sup>2</sup>Фам Д.К.

кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник, старший викладач,

<sup>2</sup>Мусієнко О.С.

аспірант, асистент,

<sup>2</sup>Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського,

м.Київ, Україна

*olga.musinko@gmail.com*

### ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНАЧИМОСТІ ЗВ'ЯЗКОВОГО АПАРАТУ У СТАБІЛІЗАЦІЇ АКРОМІАЛЬНО-КЛЮЧИЧНОГО СУГЛОБА

Вивихи акроміального кінця ключиці є доволі поширеним травматичним пошкодженням опорно-рухового апарату. Дане пошкодження становить 3–26,1 % від загальної кількості вивихів інших локалізацій і займає третє місце після вивихів плеча та передпліччя. Зустрічається переважно у чоловіків молодого, працездатного віку. Незадовільні результати лікування пацієнтів з вивихом акроміального кінця ключиці зумовлені цілою низкою чинників, однак найбільшу увагу варто приділяти складності анатомо-біомеханічних відношень анатомічних структур плечового пояса в забезпеченні рухів, насамперед у плечовому суглобі [1]. Враховувати при розробці способів оперативних втручань, що спрямовані на відновлення цієї ділянки стабілізуючого комплексу

акроміально-ключичного суглоба. Одним з важливих питань в даній роботі - є порівняння жорсткості систем з'єднання ключиці з лопаткою в залежності від комбінації цілих зв'язок (таблиця 1).

Таблиця 1.

Випадки пошкодження зв'язок, що досліджувались в роботі	
Випадок	Структура
a	Зв'язки АКС у нормі
b	Пошкодження lig. conoideum
c	Пошкодження lig. trapezoideum
d	Пошкодження lig. acromioclaviculare
e	Пошкодження lig. acromioclaviculare inferior
f	Пошкодження lig. acromioclaviculare superior, inferior
g	Пошкодження lig. conoideum, lig. trapezoideum

Але проведення натурних експериментальних досліджень по визначенню жорсткості систем не завжди є можливим, в силу своєї складності та трудомісткістю. Таким чином для вирішення поставлених задач, як альтернативу експериментальним дослідженням, було проведено моделювання процесів деформування систем ключиці та лопатки з різними комбінаціями зв'язок сучасними комп'ютерними засобами, результати дослідження яких наведені в роботі [1].

Для перевірки результатів чисельного моделювання необхідно провести відповідні експериментальні дослідження на модернізованому стенді [2].

Згідно отриманих результатів було проведено порівняння, як представлено на рис. 1.

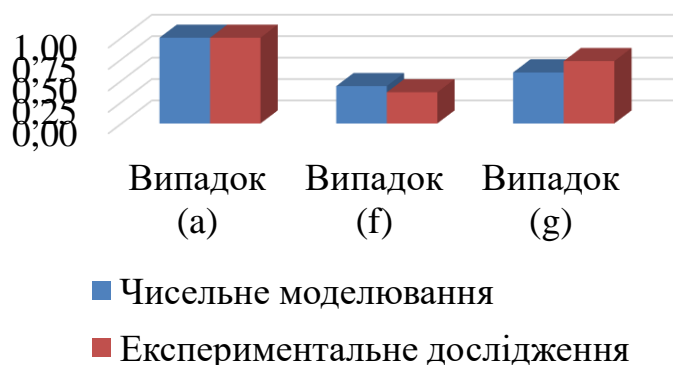


Рис. 1. Діаграма порівняння жорсткості систем з різною комбінацією зв'язок в відносних координатах отриманих з результатів чисельного моделювання та експериментального дослідження

Згідно з отриманими результатами порівняння даних за жорсткістю систем (рис. 1) при різних випадках пошкодження зв'язок отриманих за допомогою чисельного моделювання та експериментальних досліджень на основних випадках. Можна зробити висновок, що при спрощення моделі розрахунку та неврахування певних фізико-механічних факторів дозволяє оцінити різні випадки якісно, а не кількісно. Таким чином проведені експериментальні дослідження підтверджують результати якісного порівняння отриманих чисельним моделюванням.

#### Список використаних джерел

1. Фам Д.К., Бур'янов О.А., Кваша В.П., Марцьоха А.В. Анатомо-біомеханічна роль зв'язкового апарату у стабілізації акроміально-ключичного суглоба. *Травма*. 21 (3). С.12-19.
2. Романюк А.М., Фам Д.К., Тимошенко О.В., Бабак А.М. Розробка апаратно-програмного комплексу для сучасних досліджень фізико-механічних характеристик конструкційних матеріалів. *Інновації молоді в машинобудуванні*. С. 23-27.

**Возний В. І.**  
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,  
**Пономарьов О. Г.**  
доктор фізико-математичних наук, професор,  
**Сайко М. О.**  
молодший науковий співробітник,  
**Павленко Ю. А.**  
провідний інженер,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
*vozny56@gmail.com*

## ВИМІРЮВАННЯ ЕМІТТАНСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕННІНГОВСЬКОГО ДЖЕРЕЛА ІОНІВ

Проведено вимірювання еміттансних характеристик іонного джерела пеннінговського типу [1]. Джерело іонів розроблено в ІПФ НАН України для отримання двозарядних іонів гелію і являє собою джерело Пеннінга з холодним катодом. Потужність джерела 1-4 Вт, загальний іонний струм до 20 мкА. Джерело складається з циліндричного анода, катода з отвором для екстракції пучка і антикатада. Внутрішній діаметр анода дорівнює 21 мм, зовнішній діаметр 23 мм, відстань між катодом і антикатодом 30 мм, діаметр отвору екстракції 0,6 мм. Коаксіально анода розташована магнітна система, що складається з 2-х кільцевих постійних магнітів. Поздовжня складова магнітної індукції на осі розряду дорівнює 0,07-0,08 Тл. Анодна (витягуюча) напруга встановлювалась в межах  $U_d=1-4$  кВ, розрядний струм змінювався від 0,1 до 0,8 мА. Робочим газом був гелій, його тиск в розрядній камері джерела 2-10 Па. Для фокусування іонного пучка використовувалася одиночна електростатична лінза, напруга на якій змінювалась в межах  $U_{foc}=0-3$  кВ.

Вимірювання еміттансних характеристик пеннінговського джерела проводилося за допомогою електростатичного сканера, схема якого докладно представлена в роботі [2]. Сканер виконаний за схемою еміттансометра Аллісона [3] і містить дві відхиляючі електростатичні пластини, які переміщуються перпендикулярно осі пучка за допомогою крокового двигуна. Система управління та обробки даних складається з мікрокомп'ютера Raspberry pi 3В, прецизійних ЦАП/АЦП, високовольтного підсилювача пилоподібної скануючої напруги на відхиляючих пластинках сканера, та широкодіапазонного підсилювача струму. Довжина відхиляючих пластин дорівнює 100 мм, відстань між ними -10 мм, ширина вхідний і вихідний щілини 200 мкм. Еміттансометр розташовувався на відстані 40 мм від іонного джерела.

Визначення еміттанса зводиться до вимірювання розподілу інтенсивності іонного пучка  $Z(x, x')$  по координаті  $x$  та куту  $x'$ . У кожній точці з координатою  $x$  вимірюється значення іонного струму, що пройшов обидві щілини, при одночасному лінійному зміні електричної напруги між відхиляючими пластинами. Тим самим визначається розподіл інтенсивності пучка по куту  $x'$ . Повторюючи вимірювання при іншому значенні  $x$ , отримуємо повний розподіл інтенсивності пучка  $Z(x, x')$ . Даний двовимірний масив даних дозволяє визначити еміттансні характеристики іонного пучка: геометричний еміттанс пучка  $\varepsilon_{90}$ , рівний площі перетину розподілу  $Z(x, x')$ , що містить 90% частинок пучка; середньоквадратичний RMS-еміттанс пучка; параметри Твісса і рівняння фазового еліпса; профіль струму пучка і розподіл щільності струму по куту.

Величиною, що є константою при зміні енергії пучка, є нормалізований еміттанс  $\varepsilon_N$ , утворений шляхом множення еміттанса на безрозмірні релятивістські відносини  $\beta$  і  $\gamma$ . У разі нерелятивістських пучків нормалізований еміттанс дорівнює:  $\varepsilon_N = \beta\gamma\varepsilon = \varepsilon \cdot 4,6 \cdot 10^{-5} \sqrt{E/A}$ , де  $E$  – кінетична енергія пучка, еВ,  $A$  – масове число іона.

Теоретична залежність нормалізованого емітанса  $\varepsilon_N$  від іонної температури для плазмового іонного джерела з круговою апертурою має вигляд [4]:

$$\varepsilon_N = 2r_0 \sqrt{\frac{kT_i}{Mc^2}} \approx 6,4 \cdot 10^{-2} \frac{r_0 \sqrt{T_i}}{\sqrt{A}}, \text{ мм} \cdot \text{мрад}, \quad (1)$$

де  $r_0$ -радіус апертури екстракції, мм,  $k$ -постійна Больцмана,  $M$ -маса іона,  $c$ -швидкість світла,  $T_i$ -іонна температура, еВ.

В результаті вимірювання емітансних характеристик пеннінговського джерела іонів встановлено, що при енергії  $E=1,6$  кеВ геометричний емітанс пучка іонів  $\text{He}^+$  дорівнює  $\varepsilon_{90}=36,5 \pi$  мм·мрад, а rms-емітанс -  $\varepsilon_{rms}=15 \pi$  мм·мрад. На рис. 1а, б показані 3-мірна поверхня розподілу інтенсивності  $Z(x, x')$  і 2-мірна емітансна діаграма, що зображає контур геометричного емітанса  $\varepsilon_{90}$ . Профіль пучка показаний на рис. 1, в.

Нормалізований емітанс пучка дорівнює  $\varepsilon_N=0,034 \pi$  мм·мрад, нормалізований rms-емітанс -  $\varepsilon_{N,rms}=0,014 \pi$  мм·мрад. Повний кут розбіжності пучка складає 27 мрад, діаметр пучка на відстані 40 мм від іонного джерела - 4,6 мм. Температура іонів  $T_i$  на виході іонного джерела оцінювалася з рівняння (1) і дорівнює  $T_i \approx 34$  еВ.

Важливим параметром іонного пучка, який характеризує його якість, є яскравість пучка. Для пучків з азимутальною симетрією приведена яскравість визначається як:

$$B_P = \frac{2I}{\pi^2 \varepsilon^2 E}, \text{ А}/(\text{м}^2 \cdot \text{рад}^2 \cdot \text{еВ}), \quad (2)$$

де  $I$  - іоний струм пучка, А. При струмі пучка  $I=5$  мкА яскравість пеннінговського джерела, оцінена з рівняння (2), знаходиться в межах  $B_P=0,5-3 \text{ А}/(\text{м}^2 \cdot \text{рад}^2 \cdot \text{еВ})$ .

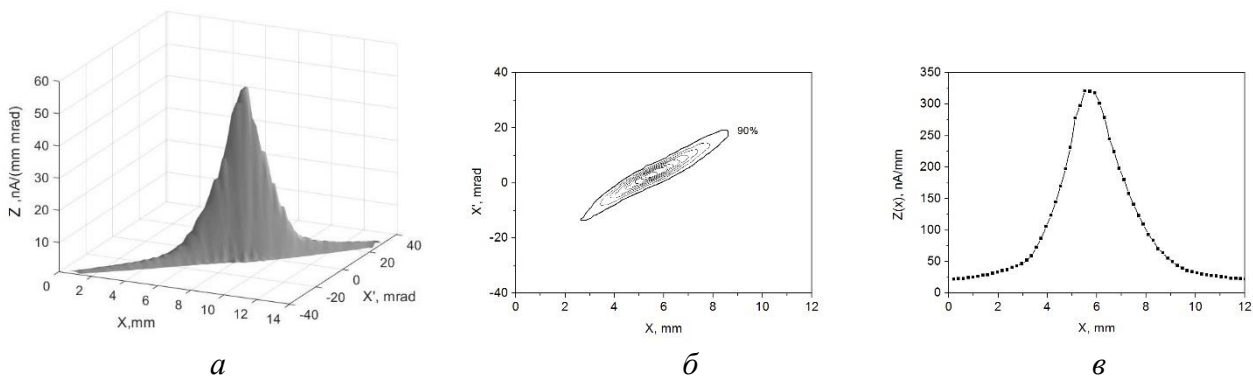


Рис. 1. а-3-D поверхня розподілу  $Z(x, x')$ , б-геометричний емітанс  $\varepsilon_{90}$ , в- профіль пучка.  $U_d=2$  кВ,  $I_d=0,66$  мА,  $U_{foc}=+1$  кВ,  $\text{He}$ .

#### Список використаних джерел

1. Возный В.И., Шульга Д.П., Дрозденко А.А., Захарец М.И. и др. Ионный источник двукратно заряженных ионов гелия на основе пеннинговского разряда. *Ядерная физика та енергетика*. 2017. Т. 18, № 2. С. 194-200. <https://doi.org/10.15407/jnpae2017.02.194>
2. Voznyi V.I., Sayko M.O., Ponomarev A.G. et al. System for Measuring Emittance Characteristics of Ion Sources. *East European Journal of Physics*. 2020. Vol. 3. P. 46-53. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2020-3-06>.
3. Allison P.W., Sherman J.D. and. Holtkamp D.B. An Emittance Scanner for Intense Low-Energy Ion Beams. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1983. Vol. 30, No 4, P. 2204-2206. <https://doi.org/10.1109/TNS.1983.4332762>.
4. Zhang H. *Ion Sources*. Science Press, Springer, New York, 1999, pp. 59.

**Возний В. І.**  
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,  
**Пономарьов О. Г.**  
доктор фізико-математичних наук, професор,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
vozny56@gmail.com

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНДУКТИВНОГО ВИСОКОЧАСТОТНОГО ДЖЕРЕЛА ІОНІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПАКЕТА COMSOL

У ІФ НАН України ведуться роботи по дослідженню високочастотних (ВЧ) іонних джерел з індуктивно-зв'язаною плазмою (ІСП) [1, 2]. Метою досліджень є розробка іонних джерел з високою яскравістю, необхідних для підвищення просторової здатності іонного мікрозонда [3], виконаного на базі електростатичного прискорювача. У даній роботі проведено чисельне моделювання індуктивного ВЧ-джерела з використанням пакета COMSOL, в якому реалізований плазмовий модуль з ІСП-блоком. Пакет є потужним вирішувачем диференціальних рівнянь в частинних похідних, заснований на методі кінцевих елементів. При рішенні використовується рідинна магнітодинамічна модель плазми, що базується на моделі, описаній в керівництві користувача COMSOL [4].

Моделювання проводилося в двомірному осісметричному наближенні. Антенною є 4-х виткова котушка мідного дроту 4 мм, намотана навколо кварцової колби з внутрішнім діаметром 28 мм і довжиною 70 мм. ВЧ-частота дорівнює 27,12 МГц, робочим газом був аргон. У плазмо-хімічній моделі аргонового розряду розглядаються чотири види часток: електрони, нейтральні атоми аргону Ar, атоми аргону в метастабільному стані Ar<sup>s</sup> й позитивні іони аргону Ar<sup>+</sup>. Подвійні взаємодії часток враховуються 7-ма реакціями: пружні зіткнення, збудження з основного стану, іонізація з основного стану, іонізація з метастабільного стану, свехупругі зіткнення, Пеннінговська іонізація, гасіння. На додаток до реакцій в плазмовому об'ємі, у моделі враховуються поверхневі реакції: поверхневе гасіння метастабільних атомів та поверхнева рекомбінація іонів аргону.

Щільність електронів  $n_e$  і щільність їх середньої енергії  $n_e$  обчислювалися, вирішуючи два дрейфово-дифузійні рівняння для щільності електронів і щільності енергії електронів:

$$\partial n_e / \partial t + \nabla \cdot \mathbf{\Gamma}_e = R_e \quad (1)$$

$$\partial n_e / \partial t + \nabla \cdot \mathbf{\Gamma}_e + \mathbf{E}_a \cdot \mathbf{\Gamma}_e = R_e + P_{ind}, \quad (2)$$

де  $\mathbf{\Gamma}_e$  – вектор потоку електронів у результаті дії електричного поля й дифузії,  $R_e$  – швидкість утворення електронів у результаті зіткнень і реакцій,  $\mathbf{\Gamma}_e$  – вектор повного потоку енергії електронів,  $(\mathbf{E}_a \cdot \mathbf{\Gamma}_e)$  – джоулевий нагрів в електростатичному амбіполярному полі  $\mathbf{E}_a$ ,  $R_e$  – щільність потужності втрат, поглиненої електронами в одиниці об'єму в результаті електрон-нейтральних зіткнень,  $P_{abs}$  – щільність потужності, поглиненої електронами від електромагнітного поля  $\mathbf{E}$ .

Для знаходження компонентів електромагнітного поля в плазмі застосовується формалізм магнітного векторного потенціалу  $\mathbf{A}$ . Для  $\mathbf{A}$  одержуємо неоднорідне векторне хвильове рівняння Даламбера:

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_r \mu_0 \partial^2 \mathbf{A} / \partial t^2 = -\mu_r \mu_0 \mathbf{J}. \quad (3)$$

Щільність електричного струму  $\mathbf{J}$  дорівнює сумі щільності струму, індукованого в плазмі, і щільності зовнішнього електричного струму в антені  $\mathbf{J}^e$ :  $\mathbf{J} = \sigma_p \mathbf{E} + \mathbf{J}^e$ , де  $\sigma_p$  комплексна провідність плазми:  $\sigma_p = n_e e^2 / [m_e (v_{en} + j\omega)]$ . Тут  $e$  - елементарний заряд,  $m_e$  - маса електрона,  $v_{en}$  - частота зіткнень електрона з нейтральними частками плазми.

Результати розрахунків показали, що при ВЧ-потужності  $P=100$  Вт і тиску  $p=3,1$  Па максимальна щільність плазми на осі розряду дорівнює  $n_e=4,7 \cdot 10^{18}$  м<sup>-3</sup>. У поздовжньому магнітному полі  $B=50$  Гс  $n_e$  збільшується до  $2,2 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>.

На рис. 1а показаний графік залежності середньої щільності плазми  $n_e$  від ВЧ-потужності  $P$  при  $B=0$ . Лінії 1 та 2 відповідають тиску 3,1 Па і 6,2 Па відповідно. Для порівняння квадратами і трикутниками показані результати експериментальних вимірювань середньої щільності плазми, виконані за допомогою СВЧ інтерферометра [5].

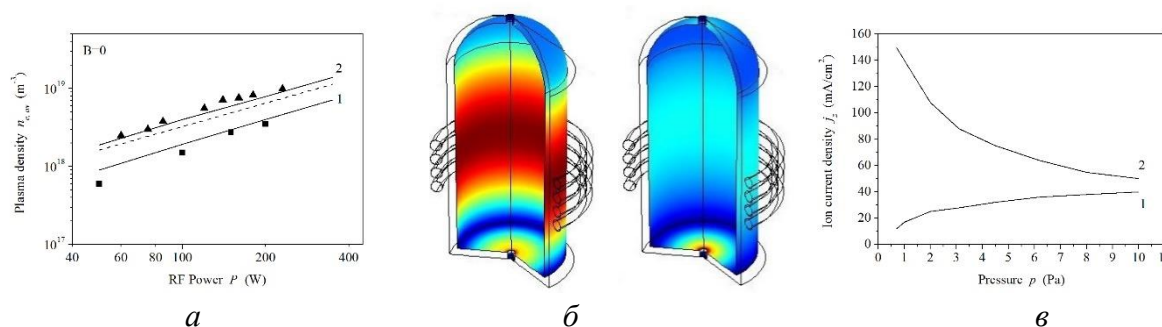


Рис. 1. а-залежність середньої щільності плазми  $n_e$  від ВЧ-потужності  $P$ , б-розподіл щільності іонного струму  $J_i$  по поверхні розрядної камери при  $B=0$  і  $B=50$  Гс, в- щільність іонного струму  $J_{iz}$  в залежності від тиску газу.

Просторовий розподіл щільності струму  $J_i$  іонів  $Ar^+$ , що йдуть на внутрішню поверхню розрядної камери, показано на рис. 1б. При  $B=0$  потік іонів йде в основному на бічну поверхню кварцової камери. При накладенні поздовжнього магнітного поля різко зростає поздовжня складова  $J_{iz}$  в області екстракції. На рис. 1в показана залежність  $J_{iz}$  від тиску аргону. Крива 1 показує залежність при  $B=0$ , крива 2 при  $B=50$  Гс. При  $P=100$  Вт, магнітному полі  $B=50$  Гс і тиску  $p=1$  Па щільність струму дорівнює  $J_{iz}=150$  мА/см<sup>2</sup> і лінійно зростає з ВЧ-потужністю.

#### Список використаних джерел

1. Voznyi V., Mirosnichenko V., Mordyk S. et al. Development of the RF Ion Sources for Focused Ion Beam Accelerators. *J. Nano-Electron. Phys.* 2013. Vol. 5. No 4. P. 04060. [https://jnep.sumdu.edu.ua/download/numbers/2013/4/articles/en/jnep\\_2013\\_V5\\_04060.pdf](https://jnep.sumdu.edu.ua/download/numbers/2013/4/articles/en/jnep_2013_V5_04060.pdf)
2. Voznyi V.I., Storizhko V.E., Mirosnichenko V.I. and Shulha D.P. Ion Current Density Calculation of the Inductive Radio-Frequency Ion Source. *J. Nano-Electron. Phys.* 2012. Vol. 4. No 3. P. 03019. [https://jnep.sumdu.edu.ua/download/numbers/2012/3/articles/en/jnep\\_eng\\_2012\\_V4\\_No3\\_03019\\_Voznyi.pdf](https://jnep.sumdu.edu.ua/download/numbers/2012/3/articles/en/jnep_eng_2012_V4_No3_03019_Voznyi.pdf)
3. Magilin D.V., Ponomarev A.G., Rebrov V.A. et al. Performance of the Sumy nuclear microprobe with the integrated probe-forming system. *Nucl. Instr. and Meth. B.* 2009. Vol. 267, P. 2046-2049. DOI: [10.1016/j.nimb.2009.03.015](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.03.015)
4. COMSOL Plasma Module User's Guide Version 5.4.
5. Voznyy V.I., Mirosnichenko V.I., Mordyk S.M., Nagornyy A.G. et al. Plasma density measurement of RF ion source. *Problems of Atomic Sciences and Technology. Ser.: Plasma Physics.* 2005. Vol. 10. №1. P. 209-211. [https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT\\_2005\\_1/article\\_2005\\_1\\_209.pdf](https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2005_1/article_2005_1_209.pdf)



**Ворона М. І.**  
аспірант, спеціальність «104 Фізика та астрономія»,  
**Денисенко О. І.**  
кандидат фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник,  
**Лебедь О. А.**  
кандидат фізико-математичних наук,  
старший дослідник,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
*marina-vara@ukr.net*

## **МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ АНІГІЛЯЦІЇ ПОЗИТРОНІВ В КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ РЕАКТОРІВ**

Сучасна енергетика є найважливішим фактором розвитку суспільства. Не зважаючи на розвиток альтернативних джерел енергії (поток енергії Сонця, енергія вітру, теплоти Землі, біомаси, морів і океанів, річок, тощо), розвиток світової ядерної енергетики характеризується позитивними тенденціями. Про що, зокрема, свідчать активне будівництво нових і модернізація вже діючих реакторів у багатьох країнах.

Актуальною на сьогодні проблемою є вивчення впливу радіаційного випромінювання на різні типи металів, зокрема конструкційних матеріалів ядерних та термоядерних реакторів. Однозначно пояснити дію радіаційного випромінювання на матеріал досить складна задача, оскільки після опромінення він змінює свої властивості. Тому, конструкційний матеріал реактора має відповідати ряду вимог: бути стійким до корозії та термо-механічним впливам; мати високу технологію виготовлення; мати хороші ядерно-фізичні властивості; мати високу радіаційну стійкість [1].

У міру накопичення експериментальних і теоретичних результатів, а також внаслідок вдосконалення методики досліджень, виявилось можливим використовувати ефекти, пов'язані з позитрон-електронної анігіляцією в речовині, для вивчення властивостей матеріалів. Одним з таких методів є метод позитронної анігіляційної спектроскопії (ПАС), що включає в себе: вимір часу життя позитрона, методи визначення ймовірностей  $3\gamma$ - і  $2\gamma$ -анігіляцій позитронів, вплив на основні характеристики анігіляції різних зовнішніх факторів. Даний метод використовується для дослідження електронної структури матеріалу і концентрацій точкових і протяжних дефектів.

Метод ПАС має в основному три методи вимірювань:

- 1) часовий розподіл анігіляційних фотонів;
- 2) кутовий розподіл анігіляційних фотонів;
- 3) доплерівське розширення анігіляційної лінії з енергією 0.511 MeV

Перший метод дає інформацію про електронну густину щільності в місці анігіляції позитрона, два інших – інформацію про розподіл імпульсів електронів і про хімічний склад середовища, навколишніх нанооб'єктів в місці анігіляції.

Час життя позитрона  $\tau$  і, відповідно, швидкість анігіляції позитрона  $\lambda$  визначається перекриттям густини електрона  $n_-(r)$  і позитрона  $n_+(r) = |\psi_+(r)|^2$  в області локалізації останнього. Тут залежність від  $r$  визначає залежність від просторових координат,  $\psi_+(r)$  – хвильова функція позитрона [2-5].



В загальному випадку швидкість анігіляції позитрона  $\lambda$  в матеріалі залежить від перерізу анігіляції електрон-позитронної пари та розподілу електронної густини і може бути визначена наступним чином:

$$1. \quad \lambda = \frac{1}{\tau} = \pi r_0 c^2 \int |\psi_+(r)|^2 n_-(r) \cdot \gamma \cdot dr,$$

де  $r_0$  та  $c$  – класичний радіус електрона та швидкість світла у вакуумі. Тут також введена кореляційна функція

$$2. \quad \gamma \equiv \gamma[n_-(r)] = 1 + \frac{\Delta n_-}{n_-},$$

яка описує локальні зміни електронної густини внаслідок кулонівської взаємодії позитрона. Локальні утворення (дефекти) характеризуються меншою електронною густиною порівняно з бездефектними областями, тому час життя позитрона в цьому дефекті буде більше. При цьому кожен дефект має власний час життя  $\tau_i$ , а інтенсивність  $I_i$  відповідної компоненти в сумарному експериментальному спектрі визначається з концентрацією таких дефектів.

Для більш детального вивчення електронної структури речовини та її фізичних властивостей розроблено низку методів. Всі вони мають свої переваги та недоліки та відрізняються необхідними вихідними даними. Для проведення розрахунку можна використовувати метод Хартрі-Фока і його узагальнення, метод псевдопотенціалу, теорію функціоналу щільності (для якої необхідно визначити тільки геометрію структури, що розраховується). Для розрахунків дуже великих систем (більше 104 атомів) зазвичай застосовуються методи, що ґрунтуються на емпіричних потенціалах взаємодії. При цьому не розв'язується рівняння Шредінгера або його аналоги (рівняння Хартрі-Фока або Кона-Шема), а просто обчислюється енергія системи частинок, що взаємодіють за допомогою емпірично підібраних потенціалів.

Таким чином, позитронна анігіляційна спектроскопія дає унікальні можливості в дослідженні точкових дефектів конструкційних матеріалів реакторів. Проте, визначення швидкості анігіляції позитрона потребує обчислення електронної густини та її локальних змін поблизу дефектів, що на сьогоднішній день потребує розвитку ефективних та достовірних методів.

#### Список використаних джерел

1. Воеводин В.Н.. Конструкционные материалы ядерной энергетики – вызов 21 века. *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2007, №2, с. 10-22.
2. West, R. N. (1979). Positron Studies of Lattice Defects in Metals. *Positrons in Solids*, 89–144.
3. Puska M.J., Nieminen R.M. Theory of positrons in solids and on solid surfaces. *Reviews of Modern 2. Physics*. 1994, v. 66, p. 841-897.
4. Графутин И., Прокопьев Е. П. Применение позитронной аннигиляционной спектроскопии для изучения строения вещества. Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова, г. Москва УФН, (2002)
5. Дудник А.Б. и др., Цифровой спектрометр времени жизни позитронов на основе метода  $\beta^+$ - $\gamma$ -совпадений, *ВАНТ*. 2013. №2 (84)

**Ворошило О. І.**  
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,  
**Недорешта В. М.**  
кандидат фізико-математичних наук,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
*al-war@ukr.net*

## РЕЗОНАНСНЕ НАБЛИЖЕННЯ В КЕД ПРОЦЕСАХ 2-ГО ПОРЯДКУ ЗА СТАЛОЮ ТОНКОЮ СТРУКТУРОЮ

Процеси 2-го порядку і вище за сталою тонкою структурою в зовнішньому полі мають характерну особливість, пов'язану з виходом проміжної частинки на масову поверхню, в результаті якої знаменник в амплітудах стає рівним нулю. Для коректного обчислення амплітуди, у цьому випадку необхідний вихід за рамки теорії збурень, наприклад, шляхом підсумовування деякої головної послідовності фейнманівських діаграм. Практично таке підсумовування зводиться до врахування радіаційних поправок до мас (енергія у випадку проміжного фотонного стану) частинок, що беруть участь у процесі, яке і призводить до кінцевої ширини резонансу. Для розрахунку у цьому випадку використовується резонансне наближення, відповідно до якого скрізь, крім знаменника, 4-імпульс проміжної частинки знаходиться на масовій поверхні, а в знаменнику маса проміжної частинки отримує уявну добавку, пов'язану з ймовірності розпаду проміжного стану.

Теорія резонансу перебігу процесів достатньо добре розроблена для малих інтенсивностей поля, коли основний вклад вносять малофотонні процеси. При цьому, незважаючи на малий вклад зовнішнього поля, ймовірність процесу, при резонансному перебігу, може значно (до  $10^5$  раз) перевищувати ймовірність процесу в нерезонансних умовах, а також ймовірність цього процесу в умовах відсутності зовнішнього поля для лазер-модифікованих процесів (Рошупкін&Ворошило, 2008).

Амплітуду процесу у одномодовому лазерному полі можна представити як суму парціальних компонент, кожній з яких відповідає кількість фотонів поглинутих ( $\lambda > 0$ ) із хвилі або випромєнених ( $\lambda < 0$ ) у хвилю в першій вершині процесу та кількість фотонів поглинутих ( $\lambda' > 0$ ) із хвилі або випромєнених ( $\lambda' < 0$ ) у хвилю в другій вершині:  $S_{fi} = \sum_{\lambda, \lambda'} S_{fi}^{(\lambda, \lambda')}$ .

Метою нашого дослідження є визначення валідності резонансного наближення. Для цього отримана ймовірність процесу народження електрон-позитронної пари при розсіюванні електрона на лазерній хвилі, як в резонансному так і в загальному випадку для малої інтенсивності лазерного поля для парціального процесу, з найменшою кількістю фотонів хвилі, що допускає резонансний перебіг:  $\lambda = \lambda' = 1$ .

Слід зауважити, що розроблений метод розрахунку дозволяє отримувати ймовірності для процесів 2-го порядку з фотонним проміжним станом, що описується одною діаграмою Фейнмана. Розрахунок ймовірностей, що описується 2-ма діаграмами, ускладнений інтерференційним доданком, розрахунок якого не відрізняється від загального способу, а робіт, що містили б розрахунок ймовірностей для процесів 2-го порядку у загальному випадку в літературі відсутні. Тому в розрахунках ми користуватися тим фактом, що ймовірність знаходиться в межах:  $|w_1 - w_2| \leq w \leq w_1 + w_2$ , де ймовірності  $w_{1,2}$  відносяться до вкладу 1-ої та 2-ої діаграм відповідно.

В результаті проведених досліджень були сформульовані умови, при яких резонансний перебіг вносить вирішальний вклад у ймовірність перебігу процесу.

### Список використаних джерел

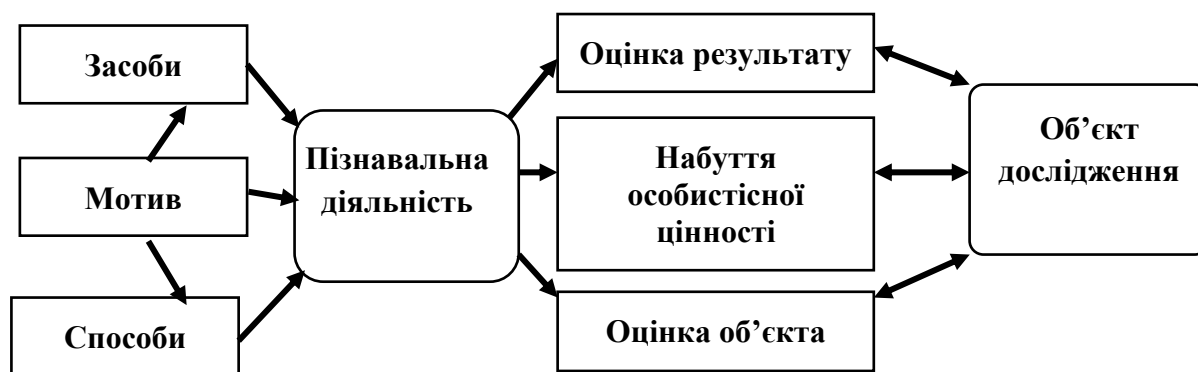
1. Рошупкін С.П., Ворошило А.И. *Резонансные и когерентные эффекты квантовой электродинамики в световом поле*: монографія. Київ: Наукова думка, 2008. 398 с.

**Гайда В. Я.**  
аспірант,  
Центральноукраїнський державний педагогічний університет  
імені Володимира Винниченка,  
м. Кропивницький, Україна  
*gaidavasil@gmail.com*

## **ФОРМУВАННЯ РЕФЛЕКСИВНО-АНАЛІТИЧНОГО КОМПОНЕНТА САМООСВІТНЬОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ УЧНІВ НА УРОКАХ ФІЗИКИ**

Фізика сприяє формуванню багатьох ключових компетентностей, в тому числі самоосвітньої як важливого елемента реалізації тенденції навчання впродовж життя. Формуванню рефлексивного-аналітичного компонента самоосвітньої компетентності учнів сприяє їх залучення до аналізу завдання або результатів проведеного дослідження що мають соціальну цінність. Висвітлення соціально важливих результатів дослідження, отриманих учнем, аналіз та розуміння їх практичного застосування, сприятиме появі бажання пізнати інші сторони досліджуваної проблеми, стане поштовхом до ще результативнішої роботи при вирішенні наступних завдань [2].

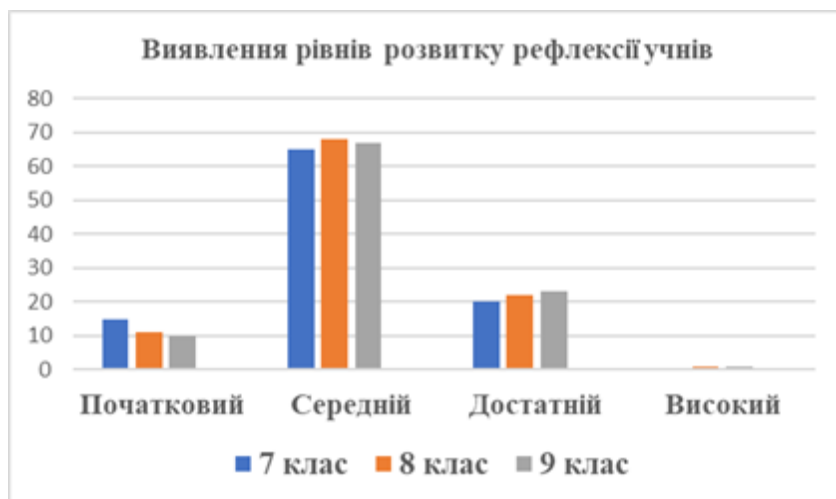
Дуже важливо учителю допомогти учневі досягти мети діяльності, та забезпечити неперервний зв'язок між етапами засвоєння самоосвітніх умінь, сформувати уміння уявляти кінцевий освітній продукт самоосвітньої діяльності, тобто забезпечити тісний зв'язок між мотиваційно-ціннісним та рефлексивно-аналітичним компонентами самоосвітньої компетентності. Схематично цей зв'язок відображено на схемі 1.



*Схема 1. Взаємозв'язок між мотиваційно-ціннісним та рефлексивно-аналітичним компонентами самоосвітньої компетентності.*

Залучаючи учнів до дослідження об'єктів та явищ навколишнього середовища, учитель активує їх мотиваційно-ціннісний компонент самоосвітньої компетентності, вмикаючи їх прагнення долучитися до пізнавальної діяльності та досягти поставленої мети. Найважливіший результат організації такої діяльності полягатиме у набутті учнями певних особистісних цінностей на основі аналізу результату дослідження. В ході пізнавальної діяльності учні збагачуються новими думками, новими мотивами, переповнюються певними емоціями викликаними осмисленням дослідженого.

Школярі основної школи відчують потребу зайняти комфортне місце в колективі, бути соціально значущим, затребуваним, що і визначає провідний мотив їхньої поведінки. Проте, на основі проведеного нами дослідження засобами блогу «Учителю фізики» ([https://ternofizik.blogspot.com/p/blog-page\\_31.html](https://ternofizik.blogspot.com/p/blog-page_31.html)) з метою виявлення рівнів сформованості рефлексії учнів, у якому взяли участь більше 900 учнів 7-9 класів закладів ЗСО, ми виявили низький рівень сформованості цього компоненту в учнів (Діаграма 1).



Діаграма 1. Рівні розвитку рефлексії учнів

Один із шляхів посилення рефлексивно-аналітичного компонента самоосвітньої компетентності учнів, на нашу думку, полягає у залученні учнів до реалізації навчальних проектів на засадах сталого розвитку. Під час реалізації яких учні усвідомлюватимуть відповідальність за доручену ділянку роботи, навчатися оцінювати власні можливості, набудуть уміння здійснювати рефлексію власної поведінки, самостверджуватися у колективі тощо. Завершений навчальний проект повинен стати засобом залучення учня до реалізації наступних проектів. Учителю варто залучити школяра до самостійного підбиття результатів навчального проекту, самоаналізу, рефлексії діяльності, аби розкрити в учнів потенціал для виконання наступних завдань. Оцінювання учнем отриманого результату, осмислення пережитих емоцій під час реалізації навчальних проектів, ґрунтовний аналіз свого внутрішнього стану сприяє розвитку саморефлексії, здатності та готовності бути суб'єктом пізнавальної діяльності [1].

Організація самостійної пізнавальної діяльності учнів на засадах сталого розвитку, самооцінювання її результатів переконують учнів у необхідності самоосвіти для самореалізації і саморозвитку, вмінню оцінити власні можливості, сприяють укоріненню соціальних цінностей та формуванню власної життєвої позиції.

#### Список використаних джерел

1. Гайда В.Я. Сучасні тенденції організації освітнього процесу з фізики на засадах сталого розвитку. *Наукові записки. Серія: Педагогічні науки*. Вип. 191. 2020. С. 230-233.
2. Садовий М. І., Трифонова О. М. Розвиток технологічної та природничої освіти в умовах сталого розвитку. *Наукові записки. Вид-во НПУ імені МП Драгоманова*, 2016. Випуск 132. С.197-206.

**Гальмаков В. С., Коноз К. О.**  
студенти, спеціальність «014 Середня освіта (Фізика)»,  
**Пухно С. В.**

кандидат психологічних наук, доцент,  
Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка

## **КОМУНІКАТИВНА КОМПЕТЕНТНІСТЬ ЯК СКЛАДОВА ПРОФЕСІОНАЛІЗМУ МАЙБУТНЬОГО ФАХІВЦЯ**

Динаміка розвитку сучасного суспільства передбачає від будь-якого фахівця професійної діяльності активності у опануванні фахового знання та оволодіння відповідними професійними компетентностями, безперервної освіти, постійного підвищення професіоналізму. Професійна компетентність розглядається дослідниками, як інтегральна характеристика, яка полягає у здатності розв'язувати задачі та проблеми, що виникають у діяльності, з використанням знань професійного досвіду, здібностей. Професійна компетентність постає головним компонентом системи професіоналізму фахівця, зокрема, – професійні знання, що дозволяють ефективно виконувати професійну діяльність. Сучасний фахівець на сьогодні – це висококваліфікований професіонал, що володіє загальною ерудицією та знаннями певної галузі, стратегічним мисленням, володіє комунікативною компетентністю, – досягає взаєморозуміння і організовує ефективну взаємодію з окремими людьми, групою, громадськістю. Серед досліджень комунікативної компетентності фахівців різних спеціальностей праці С. Александрової, Т.Бутенко, Л. Гавриляк, Д. Годлевської, І Данченко, О. Загородної, Н. Завіниченко, Д. Ізаренкова, О. Касаткіної, І. Козубовської, О. Краєвської, С. Макаренка, В. Назаренко, З. Підручної, Л. Пляки, М.Тимофієвої, А Хом'як, В. Черевко та ін. [1, с. 70]. Результати досліджень проблем формування комунікативної компетентності майбутніх педагогів представлені в авторській публікації [2].

Комунікативна компетентність розглядається в науковій літературі як здатність людини встановлювати та підтримувати необхідні контакти. До комунікативної компетентності дослідники відносять сукупність знань, умінь та навичок, які забезпечують ефективне здійснення комунікативного процесу в цілому. Деякими дослідниками під комунікативною компетентністю розуміється здатність людини визначати цілі комунікації, вирішувати певні типи комунікативних задач: оцінювати ситуацію, використовувати різні способи комунікації, володіти засобами змінювати мовленнєву поведінку, тощо. Все визначене і забезпечує успішну комунікацію [1, с. 71].

Комунікативна компетентність – це узагальнена комунікативна властивість особистості, що включає розвинуті комунікативні здібності, сформовані уміння і навички міжособистісного спілкування, знання про основні його закономірності та правила. Сформована комунікативна компетентність забезпечує можливість успішно вступати у різні контакти з метою вирішення комунікативних задач. До комунікативних знань і вмінь, що забезпечують сформовану комунікативну компетентність, відносяться: знання норм спілкування; високий рівень мовлення людини, що забезпечує можливість об'єктивно передавати та сприймати інформацію; розуміння значення та володіння можливостями невербального спілкування; вміння контактувати з людьми з врахуванням вікових, статевих, статусних та інших характеристик; вміння здійснювати аргументований вплив на співрозмовника; здатність обирати власну комунікативну стратегію в залежності від оцінки ситуації. Визначені характеристики є складовою комунікативної компетентності фахівця будь-якої галузі, тому ця компетентність – невід'ємна складова професійної підготовки людини.

Формування комунікативної компетентності майбутнього фахівця, зокрема, педагогічної діяльності, відбувається у закладах вищої освіти (ЗВО). Складові комунікативної компетентності формуються в процесі вивчення навчальних дисциплін, так,

якщо студенти на основі вивченого матеріалу виконують творчі завдання, то це надає їм можливість оволодіти прогнозуванням і програмуванням комунікативної ситуації; оволодіти різними засобами спілкування, стратегіями поведінки під час взаємодії, тощо. Також, розвиток і формування комунікативної компетентності фахівця пов'язано зі змінами в індивідуально-психологічній, емоційно-вольовій, особистісній сфері людини. Формування комунікативних навичок, вольової саморегуляції, міжособистісної рефлексії, емпатії є важливим завданням організації навчально-виховного процесу ЗВО [2].

В ході вивчення дисципліни «Психологія», що входить до блоку обов'язкових дисциплін підготовки фахівця закладу вищої освіти, студенти виконують наступні завдання: підготовка доповіді та виступ з певної проблеми в ході роботи на практичному занятті; участь у дискусії з певної психологічної проблеми; моделювання різних конфліктних ситуацій, їх причин виникнення, динаміки проходження, розвитку та стратегій поведінки, наслідків; підготовка презентацій з мультимедійним супроводом з питань, пов'язаних з майбутньою професійною діяльністю; проведення і аналіз ділових ігор; комунікативних вправ; виконання індивідуальних навчально-дослідних завдань; роботи у групах з виконання завдань проекту з актуальних психологічних проблем сучасності, тощо [2].

Активізація роботи студентських наукових гуртків, а саме: проведення лекцій з участю студентів на різні теми психологічних особливостей комунікативного процесу; організація диспутів; аналіз проблемних ситуацій; впровадження в навчальний процес у закладах вищої освіти різних інтерактивних методів (зокрема, психологічних тренінгів), - необхідні умови формування комунікативної компетентності юнаків. Сьогодні потребує розробки програм, просвітницьких заходів та психологічного консультування студентів фахівцями служби психологічного супроводу з проблем долання виникнення бар'єрів у процесі спілкування.

#### **Список використаних джерел**

1. Гавриляк Л. С. Комунікативна компетентність як складова професійної підготовки сучасного фахівця. *Науковий журнал «ЛЮГОС. Мистецтво наукової думки»*. 2019. №3. С. 70-73.
2. Кузікова С. Б., Пухно С. В. Розвиток емоційно-вольового компоненту комунікативної компетентності майбутніх педагогів. *Теоретичні і прикладні проблеми психології: зб. наук. праць Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2019. № 3 (50), С.175-187.

**Декарчук С.О.**

старший викладач,

Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини

*dekarchukso@gmail.com*

## **ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ІНТЕРАКТИВНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПОСІБНИКІВ З ФІЗИКИ**

Реформування національної системи освіти, пов'язаних із розбудовою інформаційного суспільства, впровадженням шкільного дистанційного навчання, великого значення набуває створення нового покоління засобів навчання, які б поєднували передові досягнення педагогічної науки з дидактичними можливостями сучасних технологій [1]. Ще не так давно із терміном “книга” асоціювалося лише паперове видання, тепер це поняття розширилось і включає в себе також електронні видання. Враховуючи можливості сучасних програмних засобів та методів створення електронних та інтерактивних посібників, робота з якими значно полегшує завдання для простого користувача, створення електронного посібника (е-посібника) стає по силам навіть звичайному вчителю.

Оскільки інтерактивні видання мають багато переваг серед інших електронних видань, особливо це стосується фізики, то дослідження і аналіз методів розроблення з метою розширення сфери застосування таких видань є актуальним питанням сьогодення. Розглянемо особливості використання програмного забезпечення для створення е-посібників з фізики. По-перше потрібно розуміти всі можливості такого способу подання інформації для учнів та особливості використання інтерактивних елементів. По-друге варто звернути увагу на те чим відрізняються е-посібники від традиційних джерел на друкованій основі. Так, деякі елементи оформлення, які полегшують сприйняття матеріалу у паперових виданнях (наприклад, широкі поля, великі зображення), можуть ускладнити читання в електронній версії. Для написання тексту е-посібника використовують, здебільшого інші правила, ніж для написання паперової версії. Здійснивши аналіз подання навчального матеріалу у підручнику з фізики, шрифтових виділень, ілюстрацій та гами кольорового оформлення сторінок можна дійти висновку, що занадто різнобарвне оформлення відволікатиме увагу від основного матеріалу. Тому при виборі програмного засобів чи сервісів для створення е-посібників потрібно врахувати вище перераховані вимоги.

Розглянувши можливості програмних редакторів впливає те, що вони підтримують мультимедійний вміст, інтерактивні елементи, мають засоби для редагування текстових фрагментів, а також забезпечують захист видання від несанкціонованого копіювання.

З'ясовано, що основними інтерактивними елементами, які використовуються у електронному виданні, є [2]:

- Гіпертекстові посилання;
- Відеофрагменти;
- Навігаційні елементи;
- Кнопки текстових пояснень;
- Кнопки-перемикачі.

До різних інтерактивних елементів можна додавати виконання деяких дій. Наприклад, гіпертекстові посилання можуть бути посиланнями на інші сторінки чи фрагменти тексту, інтерактивні елементи, а також посиланнями на інтернет-ресурси, які відкриються у браузері користувача.

Відеофрагменти можна поділити на частини, додавши навігаційні точки, з яких буде починатися відтворення. До кожного відеофрагмента можна додавати панель керування, яка забезпечує різні функції, серед них пауза, старт, зупинка, перемотка відео, а також розгортання на весь екран.

Навігаційні елементи забезпечують переходи між сторінками книги (на попередню, наступну сторінку), а також на зміст посібника. Для зменшення текстового навантаження видання деякі фрагменти тексту приховано та створено кнопки, які забезпечують розкривання блоків із поясненнями [3].

Підводячи підсумок можна сказати, що наразі електронний посібник – це освітній продукт, що містить в собі значно більше функцій і можливостей ніж паперова версія. Вважаємо, що електронні навчальні видання у наш час у навчальному процесі можуть потіснити традиційні друковані, пропонуючи користувачам цілий навчально-методичний комплекс, який в одному виданні може включати як значно удосконалений за допомогою електронних технологій навчальний матеріал, так і тренувальні вправи з вбудованими можливостями самоперевірки. Засоби мультимедіа дозволяють збагатити процес навчання наочним високоякісним ілюстративним матеріалом: відео, звуковим супроводом, що сприятиме активізації образної й емоційної пам'яті.

### Список використаних джерел

1. Л.І. Білоусова, Л.Е. Гризун Науково-практичні аспекти створення і впровадження електронного підручника для вищої школи. *Інформаційні технології і засоби навчання*, 2012. №2 (28). Режим доступу до журналу: <http://www.journal.iitta.gov.ua>
2. Федорчук В. В. Електронний підручник як засіб інформатизації сучасної освіти. *Педагогічна освіта: теорія і практика*. 2012. №. 12. С. 153–158.
3. Шабатура М. Ю. Спеціалізоване програмне забезпечення інтерактивної комп'ютеризованої системи. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. № 745: Комп'ютерні системи та мережі. 2012. С. 185–189.

**Дяденчук А.Ф.**

кандидат технічних наук, старший викладач,

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного,

м. Мелітополь, Україна

*alena.dyadenchuk@tsatu.edu.ua*

### **ФОРМУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО МИСЛЕННЯ У МАЙБУТНІХ ЕКОЛОГІВ ПРИ ВИВЧЕННІ ЗАГАЛЬНОГО КУРСУ ФІЗИКИ**

У своїй професійній діяльності висококваліфікований спеціаліст потребує технічних знань пов'язаних із впровадженням новітньої техніки та технологій, механізацією та автоматизацією виробництва, модернізацією та заміною застарілого обладнання на більш сучасне [1]. Зазначені знання формуються при вивченні загальнотеоретичних дисциплін, однією з яких є загальний курс фізики. Отримані при вивченні фізики знання є основою для теоретичної і практичної підготовки ерудованого, професійно підготовленого фахівця.

Важливим питанням є розробка та удосконалення освітніх технологій, що допоможуть ефективно сформувати у здобувачів вищої освіти екологічну свідомість та технічне мислення [2].

Метою дослідження є удосконалення методичного підходу при вивченні загального курсу фізики фахівців у галузі екології задля формування технічного мислення.

Формування технічного мислення у здобувачів вищої освіти при вивченні загального курсу фізики, на нашу думку, являє собою інтеграцію певних умов у рамках системи навчання, а саме:

1) реалізація прикладної та практичної спрямованості навчання шляхом застосування професійно-орієнтованих задач [3];

2) застосування нових інформаційних технологій в процесі вивчення курсу фізики, в тому числі при розв'язуванні задач;

3) встановлення тісних міжпредметних зв'язків між природничими та фізико-математичними дисциплінами [4].

Особливості та умови професійно-орієнтованих задач задають напрямок, в якому розгортається процес мислення. Особливу увагу слід приділяти специфіці задач, оскільки вони не тільки допомагають сформувати систему знань, умінь і навичок, а й активізують самостійну пізнавальну діяльність здобувачів освіти та є засобом розвитку та мотивації студентів.

Не менш важливою умовою формування технічного мислення при вивченні фізики в спеціалістів у галузі екології є впровадження в навчальний процес інформаційних технологій. Застосування ІКТ дозволяє об'єднати словесний і наочний методи навчання, розвивати образні структури мислення, підвищувати мотивацію та можливості студентів у пошуку і переробці інформації тощо. Так, наприклад, при вивченні закону радіоактивного розпаду для візуалізації розв'язків задач можна використовувати всім знайомий і доступний MS Excel.



Впровадження в освітній процес принципів міжпредметної інтеграції призводить до більш глибокого синтезу отриманих при вивченні багатьох спеціальних дисциплін знань і вмінь.

Також не слід забувати про такий необхідний елемент формування технічного мислення при вивченні фізики, як експеримент. Закономірною в цьому випадку необхідністю є постійне звернення до фронтальних демонстрацій та лабораторних робіт.

Таким чином, впровадження в освітній процес запропонованого підходу під час вивчення курсу загальної фізики при підготовці фахівців екології з метою формування технічного мислення дозволило значною мірою розширити базу професійно спрямованих знань у технічній сфері, отриманих здобувачами вищої освіти, підвищити мотивацію студентів до освіти та самоосвіти тощо.

#### Список використаних джерел

1. Петруньок Т. Б. Формування технічної компетентності фахівців будівельної галузі у навчанні фізики. *Наукові записки. Серія : проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти*, 2017. Вип. 11 (1). С. 168-173.
2. Пшенична Н. С., Дяденчук А. Ф. Формування екологічної грамотності здобувачів освіти шляхом інтеграції знань із фізики та хімії. *Роль і місце психології і педагогіки у формуванні сучасної особистості* : збірник тез міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, Україна, 10–11 січня 2020 р.). Харків : Східноукраїнська організація «Центр педагогічних досліджень», 2020. С. 24-28.
3. Дяденчук А. Ф. Шляхи реалізації прикладної та практичної спрямованості навчання в загальному курсі фізики. *Креативний простір* : електрон. наук. журн. Харків : СГ НТМ «Новий курс», 2021. № 1. С. 27-29.
4. Дяденчук А. Ф., Пшенична Н. С. Використання міждисциплінарних зв'язків фізики і хімії під час науково-дослідницької діяльності студентів. *Наукові записки молодих учених*. № 5. Кропивницький: РВВ ЦДПУ ім В. Винниченка, 2020. URL: <https://phm.cuspu.edu.ua/ojs/index.php/SNYS/article/view/1733>.

**Дяченко М. М.**

кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник,

**Холодов Р. І.**

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,

Інститут прикладної фізики НАН України,

м. Суми, Україна

*mykhailo.m.diachenko@gmail.com*

#### НЕЛІНІЙНІ КОЛЕКТИВНІ ЕФЕКТИ ПРИ ГАЛЬМУВАННІ ЗАРЯДЖЕНОЇ ЧАСТИНКИ В ЗАМАГНІЧЕНІЙ ЕЛЕКТРОННІЙ ПЛАЗМІ

Актуальність дослідження нелінійних ефектів при гальмуванні зарядженої частинки в замагніченій електронній плазмі зумовлена проблемами теоретичного опису методу електронного охолодження [1] антипротонів та важких від'ємно заряджених іонів. Наявність сильного магнітного поля в даному методі призводить до появи відмінності між втратами енергії різноманітних заряджених частинок і на даний момент повної послідовної теорії цього ефекту ще не існує. Вирішення цієї проблеми є також актуальним для експериментів на накопичувачі заряджених частинок HESR (High Energy Storage Ring) у проєкті FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) де будуть застосовувати електронний охолоджувач для пучків антипротонів.

В даній роботі в рамках фізики плазми теоретично розглянуто втрати енергії важкої зарядженої частинки при проходженні через електронну плазму для випадку сильного магнітного поля. Даний підхід дає можливість розглянути колективні ефекти при гальмуванні частинки в плазмі, тобто далекі зіткнення.

У випадку сильного магнітного поля (циклотронна частота  $\omega_B \rightarrow \infty$ ), якщо частинка рухається вздовж магнітного поля та у лінійному наближенні за збуренням, джерелом якого є зовнішня частинка, електрична сприйнятливість електронної плазми має вигляд [2]-[4]:

$$\chi_{\vec{k},\omega}^{(1)} = \frac{\omega_p^2 k_z^2}{\omega^2 k^2}.$$

Тоді втрати енергії можна визначити таким чином [3]:

$$-\frac{d\varepsilon^{(1)}}{dt} = -\frac{ie^2}{2\pi^2} \int d^3k \frac{\omega}{k^2(1-\chi_{\vec{k},\omega}^{(1)})} = \frac{e_p^2 \omega_p^2}{2\nu_p}.$$

Для врахування відмінності між втратами енергії різнойменно заряджених частинок використовується нелінійна сприйнятливість електронної плазми [2]:

$$\chi_{\vec{k}_1,\omega_1,\vec{k}_2,\omega_2}^{(2)} = -\frac{ie}{2m} \frac{e\omega_p^2}{\omega\omega_1\omega_2} \frac{k_z k_{1z} k_{2z}}{kk_1 k_2} \left\{ \frac{k_{1z}}{\omega_1} + \frac{k_{2z}}{\omega_2} + \frac{k_z}{\omega} \right\}.$$

Якщо частинка рухається вздовж магнітного поля маємо:

$$-\frac{d\varepsilon^{(2)}}{dt} = -\frac{3ie^3 e\omega_p^2}{8\pi^4 m\nu_p^3} \int d^3k_1 d^3k_2 \frac{k_z}{(kk_1 k_2)^2} \frac{1}{\varepsilon_{\vec{k},\omega} \varepsilon_{\vec{k}_1,\omega_1} \varepsilon_{\vec{k}_2,\omega_2}}.$$

З останнього виразу видно, що втрати енергії у випадку сильного магнітного поля залежать від знаку заряду зовнішньої частинки і таким чином для далеких зіткнень можна врахувати методами фізики плазми відмінність гальмування різнойменно заряджених частинок.

#### Список використаних джерел

1. Будкер Г.И., Скринский А.Н. Электронное охлаждение. Основные возможности в физике элементарных частиц. УФН. 1978. Т. 124. С. 561.
2. Ситенко А.Г. Флуктуации и нелинейное взаимодействие волн в плазме. К.: Наукова думка, 1977. 248 с.
3. Sorensen A.H., Bonderup E. Electron cooling. Nuclear Instruments and Methods. 1983. Vol. 215. P. 27.
4. Sayasov Yu.S. Nonlinear theory of ion stopping in classical plasmas: application to the Barkas effect. Laser and Particle Beams. 1992. Vol. 10. P. 505.

**Ільченко В. Р.**

магістрантка, спеціальність «014 Середня освіта (Фізика)»,

**Каленик М. В.**

кандидат педагогічних наук, доцент,

Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка

*tegricavika612@gmail.com*

#### УЗАГАЛЬНЕННЯ І СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ЗНАНЬ УЧНІВ З ФІЗИКИ

Завданнями навчання фізики є формування в учнів глибоких, міцних і дієвих знань, основ фізики і їх практичних застосувань, знань про методи природничо-наукового пізнання і структуру наукового знання, розвиток їх мислення тощо. Один із шляхів

вирішення цих завдань – організація спеціальної роботи з узагальнення та систематизації знань.

Під систематизацією розуміють розумову діяльність, в процесі якої досліджувані об'єкти організовуються в певну систему на основі вибраного принципу [5].

При систематизації здійснюються такі розумові операції, як аналіз і синтез, порівняння і класифікація, в ході яких учні виділяють схожість і відмінність між об'єктами і явищами, групують їх відповідно до обраних ознак або підстав, встановлюють причинно-наслідкові зв'язки, сутнісні відносини між об'єктами і явищами. У процесі систематизації знань встановлюються не тільки смислові, причинно-наслідкові, а й структурні зв'язки, зокрема зв'язки між компонентами структури елементів фізичного знання: зв'язки всередині фізичних понять, законів, теорій, картини світу. В цьому випадку вирішується завдання формування системності знань учнів.

Засвоєння учнями відповідного компонента навчального змісту передбачає розуміння і знання повних наборів істотних ознак даного компонента, тобто системи структурних елементів.

Між системами структурних елементів, самими структурними елементами існують зв'язки послідовності, перетинання, поглинання.

Сутність зв'язку послідовності полягає в тому, що одні структурні елементи, їх системи не можуть бути введені раніше інших. Цей зв'язок дозволяє встановити логіку, послідовність у вивченні програмного матеріалу, запобігти догматизму під час його вивчення, враховуючи, що введення нового матеріалу ґрунтується на раніше розглянутих компонентах змісту шкільного курсу фізики, їх істотних ознаках і відповідних способах діяльності.

Сутність зв'язку перетинання полягає в тому, що існують системи істотних ознак аналогічні за змістом і структурою. Це означає, що поняття, які відносяться до певного компонента навчального предмета, повинні складатися з однакових наборів їх істотних ознак. Отже для кожного компонента змісту шкільного курсу фізики можна знайти загальний набір структурних елементів.

Сутність зв'язку поглинання полягає в тому, що компоненти і їх системи структурних елементів можуть бути різних рангів, між ними існує ієрархія. Системи вищого рангу характеризуються тим, що деякі їх структурні елементи можуть бути розкриті через зміст систем нижчого рангу (супідрядні), тобто є їх узагальненнями.

Отже, у змісті шкільного курсу можна знайти такі компоненти, навколо яких групуються інші компоненти, тобто існують змістовні (генеральні) лінії розвитку змісту навчального предмета [4].

Психологи відзначають, що знання учнів більш глибокі та міцні, якщо вони пройшли систематизацію та узагальнення. Систематизація дозволяє використовувати пам'ять, так як звільняє її від необхідності запам'ятовувати матеріал як суму приватних відомостей і фактів за рахунок угрупування їх у більші одиниці. Сам механізм сприйняття інформації людиною пов'язаний з діяльністю систематизації: при сприйнятті нової інформації ми зіставляємо її з уже відомим знанням (асоціація), намагаємося згрупувати нову інформацію.

Використання систематизації не лише впорядковує знання людини про об'єкти пізнання, але і служить джерелом нових знань. Учитель повинен ознайомити учнів з прийомами систематизації, щоб вони могли застосовувати їх самостійно. Систематичність – це така якість знань, яка характеризується в свідомості учня наявністю логічних зв'язків між компонентами досліджуваних явищ. Відбір навчального матеріалу йде з урахуванням системи: вивчається ряд явищ, пов'язаних між собою, і одночасно з урахуванням принципу «від простого до складного». У кожному розділі навчальна інформація систематизується навколо стрижневих понять. Наприклад, в Механіці – матеріальна точка, тіло, речовина, поле, взаємодія, енергія.

Методологічною основою систематизації знань учнів є прийнятий в науці системний підхід – методологічне засіб вивчення інтегрованих об'єктів і інтегральних залежностей і

взаємодій, який дозволяє, з одного боку, дати загальне уявлення про процес, явище, об'єкт, а з іншого боку, побачити їх компоненти, зв'язки між ними, місце даної системи в складі іншої, більш складної [5].

Об'єктивною науковою основою систематизації знань учнів є особливості фізичної науки і фізики – навчального предмета, що відрізняється логічною стрункністю, як самого наукового знання, так і процесу його становлення.

Дидактичною основою систематизації знань учнів є закономірності засвоєння учнями знань і способів діяльності, відображені в принципі систематичності і послідовності в навчанні, а також в принципі системності.

Психологічною основою систематизації знань учнів є утворення асоціативних зв'язків: локальних, частково системних, внутрішньо системних і міжсистемних. У перших трьох випадках систематизація носить, головним чином, внутрішньо предметний характер; в четвертому – міжпредметний. Відповідно можна виділити кілька об'єктів систематизації знань з фізики:

- наукові факти (явищ, процесів);
- фізичні поняття, в тому числі фізичних величин;
- фізичні закони;
- фізичні теорії;
- загальнонаукові методологічні принципи;
- фізична картина світу [5].

Крім цього, може здійснюватися систематизація знань на основі тих чи інших стрижневих ідей курсу, зокрема, доцільна систематизація прикладних знань у відповідності з основними напрямками науково-технічного прогресу, світоглядних і методологічних знань відповідно до циклом наукового пізнання або на основі філософських категорій матерії, руху, простору-часу, взаємодії, уявлення про які розвиваються по мірі вивчення курсу.

У разі систематизації знань на міжпредметному рівні мова повинна піти про загальні природничі поняття, закони, теорії і картини світу [3].

Об'єкт систематизації залежить від того, на якому етапі вивчення курсу фізики її проводять. Так, в кінці вивчення теми систематизують знання про фізичні явища, поняття, величини і закони; в кінці вивчення розділів – про фізичні теорії; в кінці вивчення курсу – про фізичну картину світу; перед подачею нового матеріалу важливо узагальнити вивчене на минулих уроках.

Дидактична роль систематизації знань полягає в тому, що об'єднання в систему знань про факти, явища, закономірності, принципи дозволяє розкрити нові, невідомі учням до цього зв'язки і відносини між ними, зробити узагальнення світоглядного характеру і перетворює систематизацію в засіб пізнання. Рівень сформованості в учнів системи знань є важливим показником їх інтелектуального розвитку, він визначає можливості учнів справлятися з новими пізнавальними завданнями, перебудовувати знання, включати їх в нові системи, тобто служить показником можливості учнів здійснювати творчу діяльність. У процесі систематизації увага і діяльність учнів спрямовані на виділення головного, на об'єднання безлічі ізольованих фактів в групи, що дозволяє впорядкувати знання, розвантажити пам'ять, більш повно охопити і осмислити інформацію. При цьому часто відбувається узагальнення знань учнів, що полягає в розумовому об'єднанні предметів і явищ, подібним з яких-небудь ознаками. Узагальнення передбачає початкове вивчення об'єктів, виділення в них загального і особливого, об'єднання їх в групи за відібраними ознаками, поділ на види тощо.

Узагальнення знань – перехід на вищій щабель абстракції шляхом виділення загальних ознак (властивостей, відносин, зв'язків і тощо) об'єктів і явищ. Узагальнення знань призводить до істотної зміни їх якості, до засвоєння ядра знань, їх системи. У цьому сенсі узагальнення тісно пов'язане з принципом генералізації, який передбачає, що

результатом навчання учнів є така система знань, в якій часткове підпорядковане загальному, несуттєве і другорядне – головному [1].

Узагальнення знань і вмінь учнів з фізики сприяють так звані узагальнені плани вивчення тих чи інших елементів знань, формування тих чи інших експериментальних умінь, розроблені А.В. Усовою [6].

Існують кілька видів систематизації знань. Найважливішим є класифікація - вид систематизації, при якому об'єднання об'єктів відбувається на базі певних істотних ознак, що дозволяє виділити істотне, загальне, що об'єднує об'єкти в систему, і їх специфічні відмінності [2].

Іншим видом систематизації є встановлення логіко-генетичних зв'язків, відображених у визначенні понять.

Систематизація знань може бути спрямована на встановлення причинно-наслідкових зв'язків між явищами. Зокрема, після вивчення первинних відомостей про будову речовини учням можна запропонувати пояснити ряд явищ на основі тих чи інших положень молекулярно-кінетичної теорії та скласти відповідну таблицю. При вивченні електричного поля дуже часто вчитель звертається до встановлення причинно-наслідкових зв'язків, наприклад, при вивченні реостата і принципу його дії.

Систематизація може здійснюватися шляхом порівняння, тобто встановлення подібності, відмінності або аналогії між об'єктами і явищами. При цьому схожість або відмінність не тільки встановлюється, але і пояснюються їх причини [5]. Прикладом може служити зіставлення електростатичного та гравітаційного полів, електростатичного та магнітного тощо. Результати роботи з узагальнення та систематизації знань можуть бути оформлені у вигляді таблиць, схем, діаграм, опорних конспектів.

Систематизація і узагальнення тісно пов'язані в процесі переробки одержуваної навчальної інформації. Природні процеси систематизації та узагальнення отриманої інформації, що протікають стихійно у школярів, вчитель повинен використовувати. Така необхідність пояснюється тим, що різко зростаючий потік інформації, який пред'являється в попередній спосіб, учні не встигають переробити, засвоїти, що знижує успішність і викликає втрату інтересу до предмета і вченню. Можна відзначити кілька підходів при проведенні систематизації та узагальнення:

- перш за все, з'ясовуючи «що узагальнюємо», Бетєв В.А. виділяє три напрямки – досліджувані об'єкти, символи, поняття;

- розглядаючи засоби узагальнення, виділяють схеми, таблиці, графи, системи рівнянь, класифікації з встановленням причинно-наслідкових зв'язків;

- кажучи про час, можна вказати - на кожному уроці, після вивчення теми або розділу, в кінці навчального року на узагальнюючих уроках;

- форма пред'явлення – вчитель сам проводить систематизацію та узагальнення на уроці; виконує це разом з учнями на занятті; видає подібне завдання учням для самостійного виконання в класі або вдома.

Озброєння учнів системою знань є однією з найважливіших задач навчання фізики. У дидактиці давно проголошений принцип систематичності і послідовності в навчанні. Він передбачає: а) вивчення матеріалу в певній послідовності, відповідне логіці науки, основи якої вивчаються в школі; б) формування у школярів системи наукових понять, умінь і навичок. Цей принцип лежить в основі побудови навчальних програм, визначає систему роботи вчителя і діяльності учнів в процесі навчання.

Систематизація не зводиться до класифікації. До систематизації призводить також встановлення причинно-наслідкових зв'язків і відносин між досліджуваними фактами, виділення основних одиниць матеріалу, що дозволяє розглядати конкретний об'єкт як частину системи. Систематизації передують аналіз, синтез, узагальнення, порівняння, результати яких використовуються і підсумовуються в систематизації.

### Список використаних джерел

1. Браверманн Э. М. Уроки повторения и закрепления материала. *Физика в школе*. 2006. №4. С. 47-50.
2. Виленская Н.А. Сопоставительные таблицы, как способ систематизации знаний. *Физика в школе*. 2002. №4. С.60.
3. Дик Ю.И. Меж предметные связи курса физики в средней школе. М.: Просвещение, 1987.
4. Каленик В.І., Каленик М.В. Питання загальної методики навчання фізики. Проб. навч. посібник. Суми: ред.-вид. відділ СДПУ імені А. С. Макаренка, 2000. 125с.
5. Теория и методика обучения физики в школе: Общие вопросы. С.Е. Каменецкий, Н.Е. Вازهевская и др. Под ред. С.Е. Каменецкого, Н.С. Пурышевой. М.: Академия, 2000.
6. Усова А.В. Систематизация и обобщение знаний учащихся в процессе обучения. Челябинск: ЧГПУ, 1998.

**Коломієць В. М.**

кандидат фізико-математичних наук, завідувач сектору,

**Шкурят О. І.**

завідувач науково-дослідного центру,

**Кравченко С. М.**

молодший науковий співробітник,

**Юнда А. М.**

старший науковий співробітник, доцент,

Інститут прикладної фізики НАН України,

м. Суми, Україна

*vkolom8@gmail.com*

### **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ НАПИЛЕННЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РОЗПИЛЕННЯ ІМПУЛЬСАМИ ВИСОКОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ВНУТРІШНІЙ ПОВЕРХНІ КАНАЛУ ПОВНОМІРНОГО АРТИЛЕРІЙСЬКОГО СТВОЛА КАЛІБРУ 30 ММ**

Для підвищення ресурсу роботи стволів артилерійського озброєння шляхом нанесення захисних покриттів, як альтернативу традиційним технологіям (гальванічне осадження, вакуумно-дугове осадження) автори роботи пропонують використати циліндричні коаксіальні магнетронні розпилювальні системи. Також в останні роки, все більш широкого впровадження набуває новий різновид технології магнетронного розпилення, а саме розпилення імпульсами високої потужності (HiPIMS – High-power impulse magnetron sputtering), яка позитивно себе зарекомендувала при отриманні захисних покриттів. Технологія HiPIMS, за рахунок формування висококонцентрованого потоку іонів матеріалу розпилення, дозволяє отримувати тверді щільні покриття зі зменшеною пористістю та покращеною топологією поверхні.

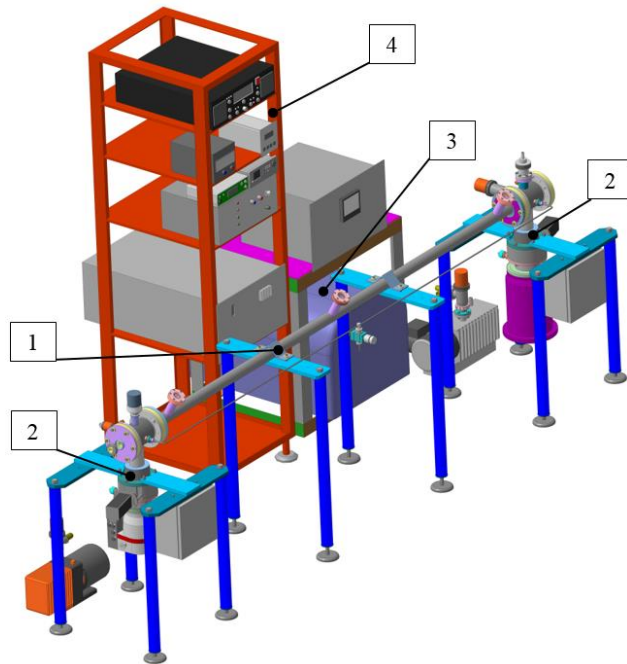
Виходячи з вищевказаного, циліндричні коаксіальні магнетронні розпилювальні системи імпульсами високої потужності мають суттєві перспективи практичного використання.

При проектуванні експериментального стенду в ході вибору оптимального калібру артилерійського озброєння було проведено переговори з потенційними споживачами (структури МО України) та виробниками вказаних калібрів. По рекомендації ДП КБ «Артилерійське озброєння» вибрано калібр 30 мм. Виробництво стволів калібру 30 мм освоєно на підприємствах України, що надає додаткові можливості швидкого впровадження розробки в промисловість.

Основними частинами експериментального стенду (рис. 1) є установка вакуумна (1), вакуумний пост (2), система охолодження катода (3) та стійка електрична (4).

Установка вакуумна довжиною 2413 мм містить 3 оглядових вікна рівномірно розподілених по всій її довжині, які необхідні для візуального спостереження за плазмою розряду в процесі отримання захисного покриття.

Вакуумні пости є завершеними самостійними агрегатами зі своїми датчиками вакууму, вакуумними насосами (турбомолекулярний, форвакуумний) та клапанами (електромагнітний клапан, високовакуумний затвор). Це дає змогу в подальшому швидко переобладнати експериментальний стенд під реальні повномірні стволи калібру 30 мм шляхом заміни лише установки вакуумної на ствол.



*Рис. 1. 3D модель експериментального стенду для магнетронного нанесення захисних покриттів на внутрішню поверхню повномірного імітатора ствола калібру 30 мм:  
1 – установка вакуумна, 2 – вакуумний пост; 3 – система охолодження катода;  
4 – стійка живлення*

Всі елементи конструкції вакуумної частини стенду виготовлені з нержавіючої сталі. Відповідно до вимог щодо якості внутрішніх поверхонь вакуумних деталей, останні мають шорсткість не гірше  $Ra=2,5$  ( $Ra$  – середнє арифметичне абсолютних значень відхилень профілю в межах базової довжини).

Для реалізації магнетронного нанесення покриттів імпульсами високої потужності використано блок живлення 4A PLASMA потужністю 6 кВт. Блок 4A PLASMA поставляється з програмним забезпеченням з можливістю підключення до персонального комп'ютера та повністю керується ним.

При проектуванні та виготовленні експериментального стенду для нанесення захисних покриттів на внутрішню поверхню імітатора стволу 30 мм враховувалась необхідність використання обладнання для контролю за технологічними параметрами в процесі отримання покриттів, а саме: індикатора вакууму, який дозволяє одночасно контролювати покази трьох вакуумних датчиків; кварцового вимірювача товщини покриття в реальному часі, безконтактного інфрачервоного датчика температури.

В процесі аналізу літературних джерел стосовно вибору найбільш перспективних матеріалів для захисту внутрішньої поверхні стволів, було встановлено, що основна увага закордонних наукових лабораторій та розробників стволів, приділена двошаровому покриттю з ніобію (температура плавлення 2477°C) та танталу (температура плавлення 3017°C) [1, 2]. Покриття з ніобію мають хорошу адгезію до гарматної сталі і можуть бути використані, як проміжний шар між гарматною сталлю і захисним покриттям з танталу. Також шар ніобію буде виконувати функцію демпфуючого прошарку і бар'єру для водню, що проходить через тантал.

Відомо, що плівки Та можуть бути отримані у двох різних кристалографічних фазах – об'ємно-центрованої кубічній ( $\alpha$ -Та) та тетрагональній ( $\beta$ -Та), які мають досить різні властивості. Танталові покриття, що містять великий відсоток бета-фази, будуть твердішими, ніж  $\alpha$ -Та покриття, але менш пластичними, і схильними до утворення тріщин внаслідок внутрішніх напружень [3]. Цей факт явно обмежує їх використання для захисту внутрішньої поверхні стволів від корозії. Тому, з точки зору захисних властивостей, перспективним є тільки покриття з фазою  $\alpha$ -Та, які можна легко отримувати за рахунок попереднього нанесення тонкого (близько декількох нанометрів) підшару Nb [4].

#### Список використаних джерел

1. Alami J., Persson P. O., Music D., Gudmundsson J. T., Bohlmark J. and Helmersson U. Ion-assisted physical vapor deposition for enhanced film properties on nonflat surfaces. *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 2005. Vol. 23. P. 278-280.
2. Avino F., Fomesu D., Koettig T., Bonura M., Senatore C., Perez Fontenla A. T., Sublet A. and Taborelli M. Improved film density for coatings at grazing angle of incidence in high power impulse magnetron sputtering with positive pulse. *Thin Solid Films*. 2020. Vol. 706. P. 138058.
3. Matson D. W., McClanahan E. D., Lee S. L. and Windover D. Properties of thick sputtered Ta used for protective gun tube coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2001. Vol. 146-147. P. 344-350.
4. Lee S. L., Windover D., Audino M., Matson D. W. and McClanahan E. D. High-rate sputter deposited tantalum coating on steel for wear and erosion mitigation. *Surface and Coatings Technology*. 2002. Vol. 149. P. 62-69.

**Коробко Я. Р.**

магістрантка, спеціальність «014 Середня освіта (Фізика)»,

**Завражна О. М.**

кандидат фізико-математичних наук, доцент,

**Дедушева І. В.**

завідувач навчальної лабораторії,

Сумський державний педагогічний університет імени А. С. Макаренка

*zavragna@gmail.com*

#### ІГРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ НА УРОКАХ ФІЗИКИ

Ще у стародавні часи людство використовувало ігри при навчанні молодого покоління. З сучасної точки зору, освітній процес не повинен бути розважальним, це обов'язкова, важка праця. Але, у зв'язку з необхідністю засвоєння великих обсягів інформації, є потреба в педагогічних технологіях, які дозволять ефективно сприймати та запам'ятовувати інформацію, бачити та розв'язувати певні проблемні ситуації, розвивати



творчі здібності та вміння робити самостійний і усвідомлений вибір. Сьогодні однією з таких технологій є ігрова технологія, яка здатна розвинути вміння і навички самостійної оцінки та відбору одержуваної інформації.

Використання ігрових технологій при навчанні фізики допомагає вчителю активізувати пізнавальну діяльність учнів і підвищити інтерес школярів до предмета. Завдяки використанню ігрових технологій учні розуміють, що фізика – це не тільки складний теоретичний матеріал, визначення та формули, але і прості досліди, демонстрації, які зрозумілі і доступні абсолютно всім.

Наведемо ігри, які можуть бути використані при навчанні фізиці:

- творчі ігри, засновані на внесенні елементів уявної ситуації, такі ігри використовуються з метою повторення і узагальнення матеріалу.

- ігри-змагання, пов'язані з виявленням переможця, можуть бути індивідуальні та колективні переможці. До таких ігор відносяться естафети, будь-які ігри на знання формул, одиниць вимірювання, імен вчених, визначень, законів і т.ін.

- ігри, в яких треба виконати цікаві завдання: придумай або відгадай загадку, відкрий «Скриньку», «Відгадай слово», поясни цікавий дослід і т.ін.

- ігри з роздатковим матеріалом: «Фізичне лото», «Базар» і ін.

- комп'ютерні ігри типу «Визнач назва приладу» або «Проведи корабель з моря в річку через систему шлюзів» допоможуть вчителю повторити пройдений матеріал, а використання гри «Запрацювало» або «Збери механізм» дозволить підштовхнути учнів до технічної творчості.

Різні види позакласної роботи з фізики так само можуть включати ігровий матеріал: ігри - змагання між класами, фізичні вечори, екскурсії та подорожі, а рольові ігри дозволять дізнатись як жилося людям до відкриття електрики, засобів зв'язку, радіоактивності.

Отже, ігри є досить ефективним засобом навчання. Гра набагато полегшує освітній процес, залучаючи в діяльність учнів з різним темпом роботи і рівнем володіння матеріалу. Вона гарантує позитивний емоційний стан, підвищує працездатність, знімає втому і підвищує мотивацію до навчання

Слід, однак, підкреслити, що ігри не можуть замінити систематичного навчання і інтенсивного тренування. Застосовувати їх потрібно доцільно і плавно й т пам'ятати, що гра є лише одним з різних засобів навчання учнів фізиці.

#### **Список використаних джерел**

1. Заболотний В.Ф., Піщенко О.В. Комп'ютерні ігри як засіб зацікавлення учнів в контексті їх підготовки до вивчення фізики. *Вісник Чернігівського державного педагогічного університету імені Т.Г.Шевченка. Серія: педагогічні науки.* Чернігів: ЧДПУ, 2006. Випуск 36. Т. 1. С. 74-78.
2. Кучерова Г.М., Ягоднікова В.В. *Інтерактивні вправи та ігри.* Харків: «Основа», 2010, 144 с.
3. Качеровська Т. *Теоретичні основи застосування ігрового проектування у вітчизняній педагогіці.* Вища школа. 2005. № 2. С.58-63.
4. Протасова С.О. Роль дидактичних ігор у процесі навчання. *Фізика та астрономія в школі.* 1999. №4. С.10-12.
5. Піщенко О.В. Дидактичні ігри, їх види і значення в навчально-виховному процесі. *Вісник Чернігівського державного педагогічного університету імені Т.Г. Шевченка. Серія: педагогічні науки.* Чернігів: ЧДПУ, 2007. Випуск 46. Т. 1. С. 139-140.

Крикля С. В.  
молодший науковий співробітник,  
Денисенко О. І.  
старший науковий співробітник,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м.Суми, Україна  
s.kryklya@gmail.com

## МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЇ АНІГІЛЯЦІЇ В ТОЧКОВИХ ДЕФЕКТАХ

Моделювання процесу електрон-позитронної анігіляції найбільш зручно проводити з позиції перших принципів, на основі теорії функціоналу густини. Згідно з даною теорією, тверде тіло приймають за систему електронів, які однаково взаємодіють між собою та утримуються атомами кристалічної решітки. Зважаючи на особливості поставленого завдання найбільш зручним програмним пакетом для моделювання електрон-позитронної анігіляції є ABINIT [1].

Для інтерпретації експериментальних результатів дослідження монокристалу кремнію, отриманих на цифровому спектрометрі [2], проведено моделювання електрон-позитронної анігіляції в монокристалі кремнію. Для моделювання була визначена кристалічна решітка кремнію. Кількість атомів – 16. Проведено два моделювання, на решітці з відсутніми дефектами, та решітці з точковим дефектом вакансійного типу. На рис.1 представлено результати моделювання ізоперхонь електронів та позитронів.

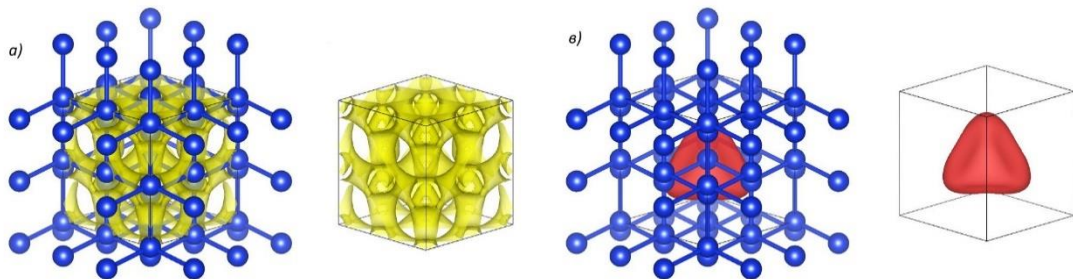
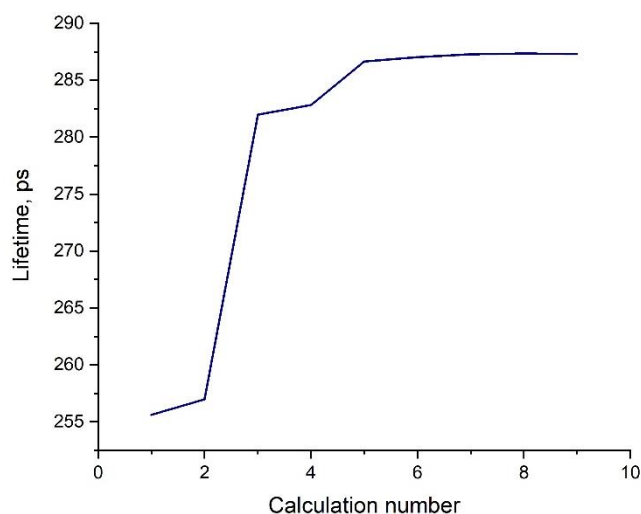


Рис. 1. Інтерпретація результатів моделювання для кристалічної решітки Кремнію: а) ізоперхня густини електронів в решітці без дефектів, в) ізоперхня локалізації позитронів в моновакансії.

Час життя позитронів для решітки без дефектів – 223 пс, відповідно для решітки з точковим дефектом – 247 пс. Ми спостерігаємо наступне, коли позитрон локалізується всередині вакансії, його тривалість життя збільшується з 223 до 247 пс. Це виникає в результаті того, що більшість позитронів локалізовані в області вакансії, де щільність електронів невелика. Ущільнення електронної та позитронної густини зменшуються, а час життя відповідно збільшується. Даний результат співпадає з результатами в роботах інших авторів [3].

Враховуючи характер поведінки точкових дефектів та їх розміри, слід також враховувати й супутні процеси, що протікають під час генерації таких дефектів. Йдеться про їх релаксацію. Додатково, слід також реалізувати самоузгодження електрон-позитронної системи. З урахуванням цих поправок, результат моделювання для утвореної раніше

вакансії становить – 255 пс. Час життя позитронів зріс, оскільки границя точкового дефекту локалізована точніше. На основі даного наближення можна враховувати й релаксацію атомної решітки. Візуальна інтерпретація результатів моделювання 10 ітерацій представлена на рис.2.



*Рис. 2. Інтерпретація результатів моделювання електрон-позитронної анігіляції з урахуванням релаксації атомної решітки. На осі абсцис відкладено номер моделювання, ординат – час життя позитронів.*

#### Список використаних джерел

1. ABINIT [Офіційний сайт]. URL: <http://www.abinit.org/>
2. Цифровой спектрометр времени жизни позитронов на основе метода  $\beta^+\gamma$ -совпадений / А.Б. Дудник, А.Н. Бугай, В.Ю. Жовкльий, А.И. Кульментьев, В.Е. Сторижко, А.И. Чемерис. *Вопросы атомной науки и техники*. 2013. № 2. С. 157-164. Библиогр.: 13 назв. рос.
3. Positron lifetime calculation for the elements of the periodic table. /J.M. Campillo Robles, E. Ogando and F. Plazaola. Published 10 April 2007. *IOP Publishing Ltd Journal of Physics: Condensed Matter*, Volume 19, Number 17.

**Лебединський С. О.**

кандидат фізико-математичних наук,  
науковий співробітник,

**Холодов Р. І.**

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
*lebedynski.s@gmail.com*

## МОДЕЛЮВАННЯ СТРУМУ ПОЛЬОВОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ ЕМІСІЇ З РЕАЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ МЕТАЛУ

Справжня металева поверхня не є ідеально гладкою і має велику кількість нано- та мікронерівностей. Ці нерівності будуть посилювати локальне електричне поле і, відповідно, струм польової емісії електронів. Ми змоделивали такі нерівності на поверхні металу і

розрахували ток автоелектронної емісії з їх урахуванням. Нерівність моделювався як півсфера з радіусом кривизни, отриманим шляхом генерування випадкового числа з нормального розподілу з математичним очікуванням  $\mu = 100$  нм і стандартним відхиленням  $\sigma$  в кілька десятків нм. Через велику міжелектродну відстань (десятки мкм) висотою нерівностей можна знехтувати. У нашій моделі вістря займають всю площу катода. У разі близького розташування вістрь ефектом екранування можна знехтувати (Бочаров & Елецкий., 2005). На малюнку представлені графіки залежності коефіцієнта посилення електричного поля  $\beta$  від величини електричного поля в залежності від напруженості електричного поля для заданих значень стандартного відхилення радіуса кривизни вістря. Коефіцієнт підсилення електричного поля був розрахований з рівності  $E_{\text{local}} = \beta E_{\text{applied}}$ , де  $E_{\text{applied}}$  – прикладене електричне поле,  $E_{\text{local}}$  – електричне поле, яке необхідно прикласти, щоб струм з ідеально гладкої поверхні (Fowler & Nordheim, 1928) дорівнював струму з модельної поверхні.

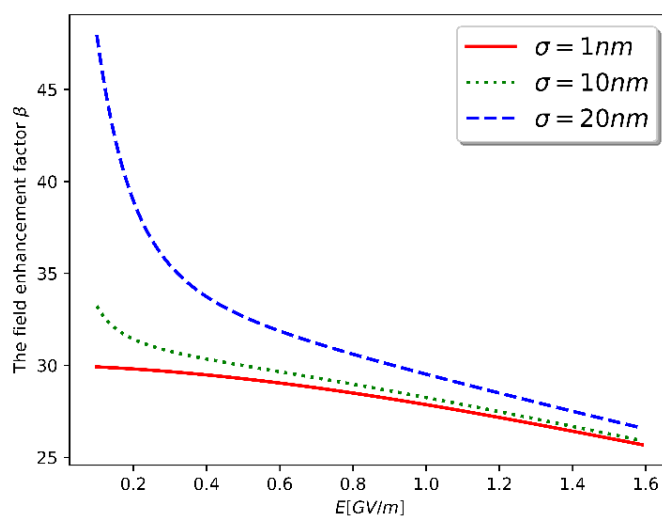


Рис. 1 Залежність коефіцієнта посилення поля від напруженості електричного поля для різних значень  $\sigma$ .

З рисунка видно, що зі збільшенням розкиду радіусів кривизни вістря на поверхні металу коефіцієнт посилення поля змінюється не лінійно, що може свідчити про те, що в даному випадку залежність струму польової емісії від напруженості електричного поля не є експоненціальною, як у випадку ідеально гладкої поверхні.

#### Список використаних джерел

1. Fowler, R. H., & Nordheim, L. (1928). Electron emission in intense electric fields. *Proc. Royal Soc. Lond. Series A.*, 173-181.
2. Бочаров, Г. С., & Елецкий., А. В. (2005). Влияние экранировки на эмиссионные характеристики холлодных полевых. *Журнал технической физики*, 126-130.

**Литвинов П. О.**  
кандидат технічних наук,  
**Батурін В. А.**  
кандидат фізико-математичних наук,  
**Пустовойтов С. О.**  
молодший науковий співробітник,  
**Роснко О. Ю.**  
молодший науковий співробітник,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
*petr.litvinov2010@gmail.com*

### **ЗБІЛЬШЕННЯ ЕМІСІЙНОЇ ЩІЛЬНОСТІ НЕГАТИВНИХ ІОНІВ З ИПФ-ДЖЕРЕЛА ЗА РАХУНОК СТВОРЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В ОБ'ЄМІ ЕМІСІЙНОЇ ОБЛАСТІ ПЛАЗМИ**

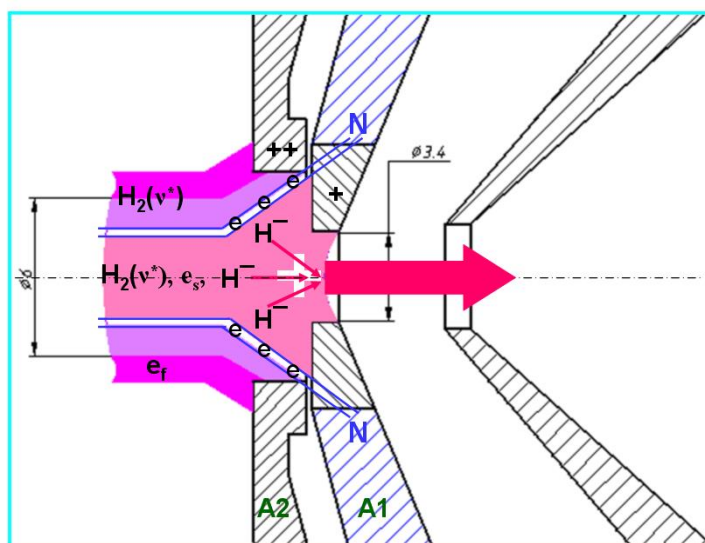
Щільність струму негативних іонів  $j_-$ , що збираються в пучок з емісійної поверхні, пропорційна концентрації негативних іонів в плазмі і швидкості їх підведення з об'єму плазми до поверхні емісії:

$$j_- = en \cdot v_-.$$

Збільшення  $n$  в об'ємі плазми, за рахунок збільшення щільності розрядної плазми, у більшості існуючих джерел практично вже досягла розумної верхньої межі. Цей висновок впливає з результатів статистичного моделювання методом Монте-Карло. У конструкції ИПФ-джерела реалізований інший механізм збільшення щільності струму негативних іонів  $j_-$ , що дозволяє впливати на спосіб і швидкість переносу  $v_-$  негативних іонів від місця їх народження до емісійного отвору.

За рахунок зміни базової конструктивної схеми джерела була створена просторова структура електричного потенціалу в об'ємі плазми перед емісійним отвором, яка витягує негативні іони з навколишньої плазми і концентрує їх в емісійній області.

Принцип роботи модернізованої конструкції ИПФ-джерела наступний (див. рисунок).



Прикладаючи до зовнішніх електродів A1 і A2 різницю потенціалів і фіксуючи її в деякій області плазми силовими лініями магнітного поля, ми створимо на границі між цими двома областями плазми електричне поле, спрямоване перпендикулярно магнітному.

У схрещених електричному і магнітному полях плазмові електрони будуть дрейфувати і в даній конструкції ГРК утворюють замкнутий електронний дрейфовий шар лійкоподібної геометрії. У цьому електронному шарі, в напрямку до емісійного отвору, будуть прискорюватися позитивні іони. Тут, перед емісійним отвором, виникне позитивний потенціал, який порушить умову квазінейтральності плазми. Щоб відновити квазінейтральність, сюди з навколишньої плазми повинен надійти негативний заряд. Але електрони замагнічені. Отже, замість електронів до емісійної поверхні з навколишнього плазми будуть витягатися  $H^-$  іони. Потрапляючи в область дії витягуючого поля, вони будуть емітовані. На їх місце з обсягу плазми будуть надходити нові негативні іони.

Таким чином, в модернізованій конструкції ИПФ-джерела організовано перенесення негативних іонів в напрямку до емісійного отвору з усієї емісійної зони дифузійної плазми.

Це дало можливість отримати рекордне значення емісійної щільності струму ( $j = 400 \text{ mA/cm}^2$ ) серед джерел з об'ємною генерацією іонів  $H^-$  працюючих в імпульсному режимі.

Досягнута величина імпульсного струму пучка, що витягується з ПФ-джерела, знаходиться в ряду кращих світових значень, одержуваних з інших об'ємних джерел, що працюють без цезієвих добавок в розрядну плазму.

**Литвинов П. О.**

кандидат технічних наук,

**Батурін В. А.**

кандидат фізико-математичних наук,

**Пустовойтов С. О.**

молодший науковий співробітник,

**Росенко О. Ю.**

молодший науковий співробітник,

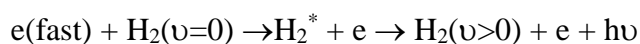
Інститут прикладної фізики НАН України,

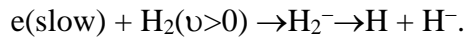
м. Суми, Україна

*Vbgftren@yandex.ru*

## ОПТИМІЗАЦІЯ ФІЗИЧНОГО МЕХАНІЗМУ ГЕНЕРАЦІЇ НЕГАТИВНИХ ІОНІВ В ИПФ-ДЖЕРЕЛІ

З метою підвищення фізико-технічних характеристик розробленого в ПФ НАН України джерела негативних іонів водню були проведені перші експериментальні дослідження по оптимізації процесів утворення негативних іонів, покладених в основу його роботи. Це найбільш ефективний на сьогоднішній день фізичний механізм генерації  $H^-$  іонів в об'ємі водневої плазми (без цезієвих домішок). Таким механізмом є двоступеневий процес дисоціативного приєднання термалізованих електронів коливально-збудженими молекулами, який відбувається через утворення проміжного короткоживучого ( $\tau \sim 10^{-15}$  s) стану  $H_2^-$ :





Ефективність цього процесу швидко зростає до значної величини ( $\geq 10^{-17} \text{ cm}^2$ ) з ростом коливального квантового числа при енергії електронів на рівні декількох електрон-вольт. Основний внесок в генерацію  $\text{H}^-$  вносять молекули, збуджені на рівні з квантовим числом  $\nu = 5 - 11$ . Виникнення коливально-збуджених молекул здійснюється в основному швидкими електронами з  $E > 10 \text{ eV}$ . Для ефективного протікання цього двоступеневого процесу, який вимагає на різних ступенях різних, в тому числі взаємовиключних умов, нами запропонований принцип функціонального зонування розрядної камери джерела. У модернізованому джерелі будуть чітко виділені три функціональні зони, в кожній з яких оптимізовано умови для виконання окремих складових частин загального процесу. У першій функціональній зоні буде відбуватися генерація плазми, в другій - коливальне накачування молекул водню, які будуть надходити в третю зону. Третя зона буде містити збагачену фракцію повільних електронів, так як фракція швидких електронів сюди не буде проникати через дію магнітного фільтра. Таким чином, в третій функціональній зоні, розташованій в емісійній області джерела, будуть створені оптимальні умови для протікання кінцевої стадії реакції утворення негативних іонів, які і будуть брати участь в емісії.

Експериментально було виявлено, що при обраному діаметрі емісійного отвору для вилучення з джерела максимального іонного струму з прийнятним співвідношенням  $I_i/I_e$  необхідно оптимізувати товщину трубчастого плазмового шару  $\Delta r$ . У відсутності нестабільностей для оцінки  $\Delta r$  було отримано співвідношення, яке добре узгоджується з вимірним експериментально. Товщину  $\Delta r$  трубчастого плазмового шару можна оцінити за глибиною проникнення  $\Delta r_1$  поперек магнітного поля швидких первинних електронів і дифузному розширенню  $\Delta r_2$  утворюється плазми:

$$\Delta r = \Delta r_1 + \Delta r_2 \approx \frac{6,6\sqrt{U}}{H} + \sqrt{t \frac{3,3 \cdot 10^8 \cdot T_e^{\frac{3}{2}} \cdot n_0 \cdot \sigma_\nu}{H^2}},$$

де  $T_e$  (eV) - температура плазмових електронів;  $n_0$  - концентрація газу;  $\sigma_\nu$  - перетин пружних зіткнень електронів з  $\text{H}_2$ ;  $t$  - час життя електронів, приблизно рівний часу життя позитивних іонів;  $U$  - падіння напруги на розряді;  $H$  - напруженість магнітного поля.

При реальних значеннях параметрів плазми в газорозрядній камері джерела було отримано:  $\Delta r_1 \approx 1,3 \text{ мм}$ ,  $\Delta r_2 \approx 0,15 \text{ мм}$  и  $\Delta r \approx 1,45 \text{ мм}$ . Тобто, діаметр анода магнетрона повинен бути більше діаметра емісійного отвору на  $\sim 3 \text{ мм}$ . З урахуванням реальних нестабільностей трубчастої структури плазми і неідеальної співвідносності газорозрядної камери це значення треба вибирати  $\sim 3 \div 4 \text{ мм}$ .

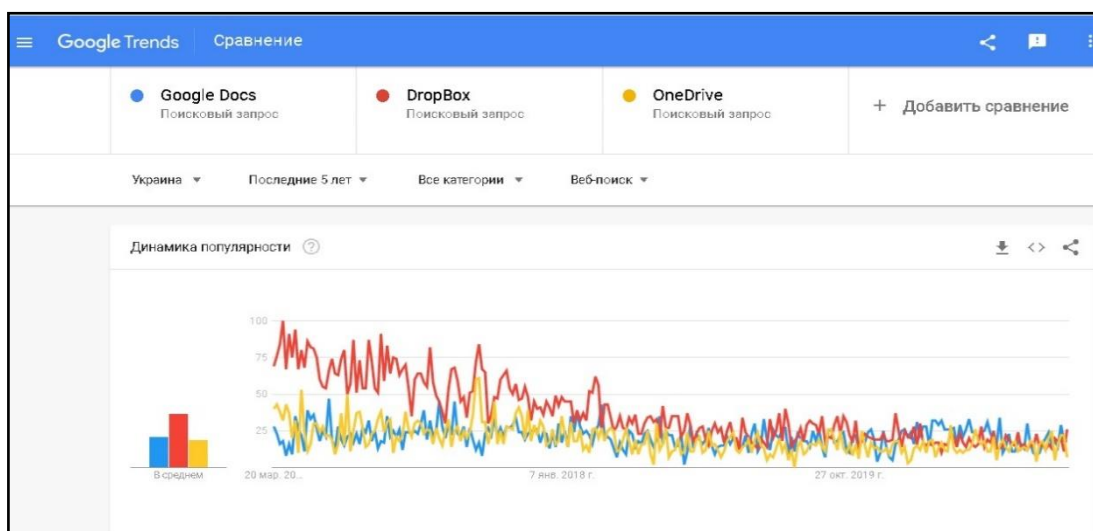
Проведені експерименти показали можливі способи модернізації базової конструкції джерела, в якій за рахунок варіювання газодинамічної картини перебігу газу, топографії магнітного поля і значень потенціалів на електродах емісійної області будуть мінятися локальні параметри плазми і, стає можливою оптимізація умов генерації, відбору та формування  $\text{H}^-$  іонів.

**Медведовська О. Г.**  
кандидат фізико-математичних наук, доцент,  
Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка  
*medvksa19@gmail.com*

## ОГЛЯД ХМАРНИХ СЕРВІСІВ, ПІДТРИМУЮЧИХ СПІЛЬНУ РОБОТУ НАД ДОКУМЕНТОМ У РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ НА ОСНОВІ WEB-СЕРВІСУ GOOGLE TRENDS

У зв'язку з поширенням у світі коронавірусної інфекції Covid-19 і переході більшості офісних працівників на віддалену роботу виникла проблема організації колективної роботи на відстані. Ситуація, що склалася торкнулася системи освіти також. Університети та школи перейшли до дистанційної форми навчання. З'явилася велика кількість наукових публікацій про впровадження змішаної форми навчання (blended learning) в освіту, яка передбачає поєднання класичної форми навчання і навчання on-line, коли учасники навчального процесу часто розділені відстанню. Виникла необхідність в інструментах, що забезпечують дистанційну форму навчання, а також потреба в методичних розробках щодо їх використання.

Одним з найбільш потужних інструментів, що забезпечують організацію навчального процесу на відстані є спільна робота над документом в режимі реального часу, яка забезпечується хмарними технологіями. Проаналізувавши ряд програмних продуктів, автором були запропоновані наступні SaaS-сервіси, що підтримують спільну роботу над документом в режимі реального часу (розглядалися тільки безкоштовні версії): Microsoft Office 365, Google Docs, Zoho Write, DropBox [4], Box, OneDrive [6], DropBox Paper, Notejoy, Slite, SMASHDOCs, Evernote, Authorea. Використання web-аналітичного інструменту Google Trends показало, що добре відомими і найбільш затребуваними в Україні хмарними сервісами є Google Docs, DropBox, OneDrive (рис.1).



*Рис.1. Порівняльний аналіз популярності хмарних сервісів Google Docs, DropBox, OneDrive в Україні*



На горизонтальній осі графіка представлений часовий проміжок пошуку терміна, обраний користувачем у вікні програми Google Trends (в нашому випадку – останні 5 років), по вертикалі – відносна популярність запиту: як часто шукали термін по відношенню до загальної кількості пошукових запитів в Україні [5]. Виходячи з отриманих даних, очевидно, що популярність розглянутих сервісів за останній рік приблизно однакова.

Особливий інтерес представляють результати, отримані з використанням web інструменту Google Trends відносно широко використовуваних в світі хмарних сервісів Notejoy, Slite, SMASHDOCs, Authorea, Evernote. Виявилось, що в Україні розглядається програмне забезпечення, що забезпечує спільну роботу над документом, все ще недостатньо поширене. Даних за запитом про сервіси Notejoy [2], Slite, SMASHDOCs [3], Authorea [1] в Україні занадто мало. Єдиний хмарний сервіс з перерахованих, який використовується в Україні-це Evernote, який, в основному використовується в містах – великих наукових центрах України (рис.2).

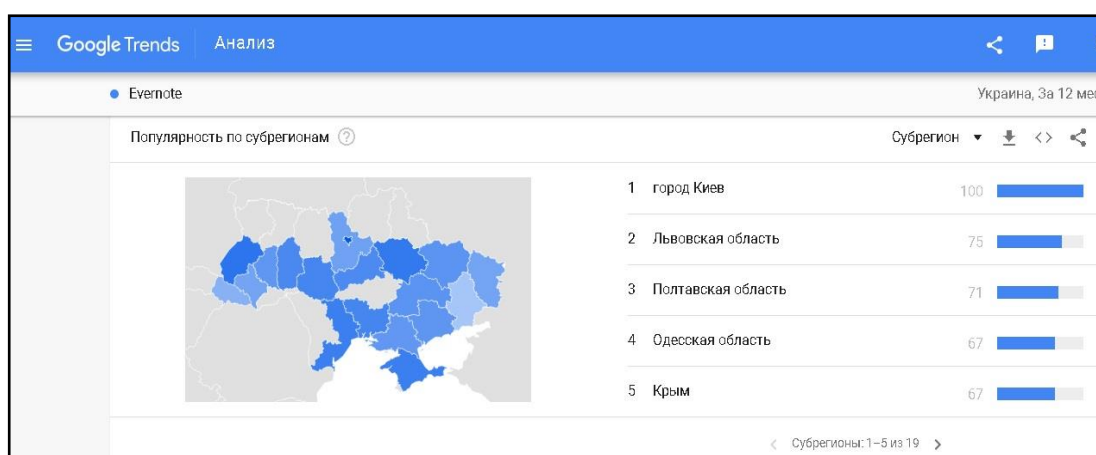


Рис.2. Популярність облачного сервіса Evernote в Україні

Вочевидь, що для затребуваності наших студентів на ринку праці слід розширювати їх науковий кругозір, шляхом ознайомлення з новітніми програмними продуктами в тому числі.

#### Список використаних джерел

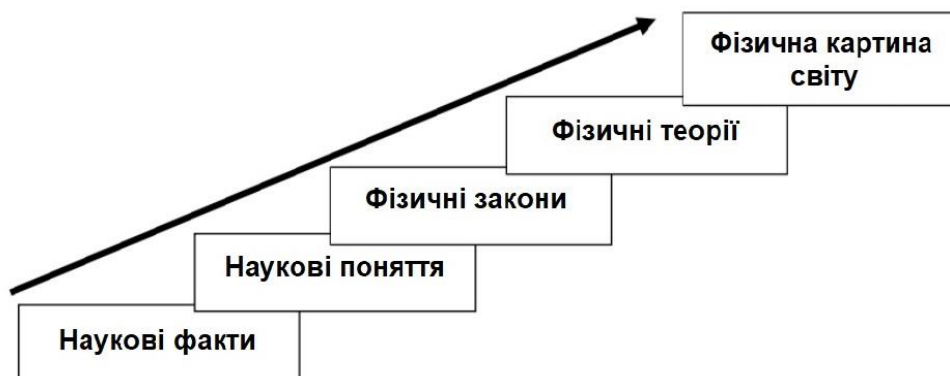
1. Authorea URL: <https://www.authorea.com>(дата звернення 20 березня 2021 р.).
2. Notejoy. URL: <https://notejoy.com/login> (дата звернення 20 березня 2021 р.).
3. SMASHDOCs. URL:<https://www.smashdocs.net/en/>. (дата звернення 20 березня 2021 р.).
4. Медведовская О., Пирханов Н. Использование облачных хранилищ данных для организации самостоятельной работы студентов. Наукові записки. Випуск 191. – Серія: Педагогічні науки. – Кропивницький: РВВ ЦДПУ ім. В. Винниченка, 2020., С.111-116.
5. Поширені запитання про дані Google Трендів. URL: <https://support.google.com/trends/answer/4365533?hl=uk>.
6. Яценко В.В., Медведовська О.Г. Особливості використання хмарного сервісу Microsoft OneDrive в сучасній системі освіти. Наукові записки. Серія: Педагогічні науки. Кропивницький, 2018. Вип. 173. С. 255-25.

**Мельник Ю. С.**  
кандидат педагогічних наук,  
старший науковий співробітник,  
Інститут педагогіки НАПН України,  
м. Київ, Україна  
e-mail: ysm0909@ukr.net

## **ОСОБЛИВОСТІ ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ МЕХАНІКИ В БАЗОВОМУ КУРСІ ФІЗИКИ**

Модернізація змісту базового курсу фізики, впровадження компетентнісної парадигми навчання не суперечить головному завданню основної школи – засвоєння цілісної системи знань, формування наскрізних умінь та предметної і ключових компетентностей. Система фізичного знання має бути не лише чітко структурованою, а й відображати логічні зв'язки в процесі переходу від нищого рівня узагальнення до вищого. До неї належать наукові факти, поняття, фізичні закони, теорії, принципи, уявлення про цілісну картину світу.

У логічній структурі фізичних знань виокремлюють два рівні узагальнення: емпіричний і теоретичний. Емпіричний – складають результати дослідів, експериментальні закони і закономірності. Теоретичний – теорії, основні ідеї, принципи, гіпотези. Водночас усі компоненти такої системи, окрім наукових фактів і принципів, мають у своєму складі таку логічну категорію як «*поняття*», повноцінне засвоєння змісту якого слугує запорукою успішного навчання фізики в основній школі (рис. 1).



*Рис. 1. Система фізичних знань*

До фізичних законів як цілісної системи належать знання про наукові факти та зв'язки між відповідними поняттями. Засвоєння базового курсу покликане передати багатогранність фізики як науки про навколишній світ, пробудити інтерес і продемонструвати необхідність виявлення основних законів під час пояснення природних явищ, їх побутового і технічного застосування.

У фізичних законах відображені стійкі й істотні відношення між величинами, обумовлені існуванням причинно-наслідкових зав'язків між природними об'єктами, явищами і процесами. Закон – головний компонент теоретичного знання, у процесі пізнання якого розкривається сутність досліджуваного явища.

Фізичні закони, що мають значну сферу застосування, називаються фундаментальними. Вони характеризуються універсальністю, високим рівнем

узагальнення і складають ядро відповідної теорії. До них належать, наприклад, закони Ньютона, збереження і перетворення енергії тощо.

Наведемо орієнтовний алгоритм вивчення фізичних законів: 1) взаємозв'язок між якими явищами або величинами виражає; 2) коли і хто вперше сформулював; 3) математичний вираз; 4) досліди, що підтверджують його істинність; 5) використання на практиці; 6) межі застосування. З одного боку, виконання подібного алгоритму спрямовує вчителя на вибір змісту навчального матеріалу, а з іншого – є нормою оцінювання знань та вмій учнів пояснювати на основі певного закону умови перебігу природних явищ і процесів, принципи роботи машин і механізмів, основи технологічних процесів.

Наведемо приклад структурних елементів фізичних знань у змісті навчання розділу «Закони збереження» базового курсу фізики (табл. 1).

Таблиця 1

### Закони збереження в механіці

<i>Закони і закономірності</i>					
Назва	Математичний запис	Зв'язок між величинами	Експериментальне підтвердження	Межі застосування	Приклади використання
Закон збереження імпульсу	$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n = \vec{p}_1^* + \vec{p}_2^* + \dots + \vec{p}_n^*$	Імпульс тіл системи до і після взаємодії	Взаємодія візків	Замкнуті системи тіл	Рух космічних апаратів, водометного катера
Закон збереження механічної енергії		Потенціальна і кінетична енергії тіл системи до і після взаємодії	Падіння тіл у розрідженому повітрі	Замкнуті системи тіл, що взаємодіють із силами тяжіння або пружності	Враховується під час конструювання технічних пристроїв
Закон зміни імпульсу тіла	$\Delta\vec{p} = \Delta\vec{F} \cdot \Delta t$	Зміна імпульсу тіла і рівнодійна всіх сил, діючих на нього		Під час будь-яких взаємодій тіл	Тиск газу на стінки посудини
Теорема про зміну кінетичної енергії	$A = \Delta E_k$	Зміна кінетичної енергії і робота сили, діючої на тіло		Під час пружних взаємодій	Набір швидкості руху тілом

Наукове поняття «фізичний закон» як окремий об'єкт у природі не існує, фактично будь-який компонент системи фізичних знань – інтелектуальний конструкт, продукт діяльності людей, оформлений у вигляді логічної моделі (поняття, закону, теорії, фізичної картини світу тощо). Фізичні поняття, закони і теорії сформульовано для ідеальних фізичних процесів або явищ, які є моделями, де відображено властивості об'єктів реального світу.

**Могильницький М. В.**

методист,

Навчально-методичний центр професійно-технічної освіти у Чернігівській області,

м. Чернігів, Україна

*nprofteh@ukr.net*

## **ФОТОГРАММЕТРИЧНІ ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В НАВЧАЛЬНОМУ ПРОЦЕСІ ВИЩОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ШКОЛИ**

Застосування фото- і відеотехніки для об'єктивної фіксації ходу лабораторних робіт і моніторингу технологічних процесів, систем безпеки, аерофотозйомки тощо: важливо і в навчальному процесі, і на практиці [1] [3]. Для цього необхідне відповідне інженерно-математичне забезпечення у вигляді засобів обробки зображень. Разом з цим потрібно розробляти і методичне забезпечення для курсового математичного навчання відповідних фахівців.

Фотограмметрія – наукова дисципліна, яка вивчає форми, розміри і положення об'єктів за їх фотографічними зображеннями («безконтактно»). Вона вивчає властивості фотозображення, методів його отримання і вимірювання, розробку приладів для вимірювання та перетворення фотозображень. Найбільш поширена – геодезія, картографія, землеустрій, аерокосмічні дослідження. У будівництві та архітектурі фотограмметрія застосовується для оцінки розмірів зведення будівель, їх деформацій; для потреб реставрації [5]. В лабораторії апаратно-програмні пристрої, що під'єднані до мікроскопа, допомагають у вивченні лабораторних зразків. За останні роки в навчальних закладах стали менше експериментувати, тому розглядаються методи здатні оживити процес навчання, наблизити його до учня.

Основою теорії фотограмметрії є математика – векторна алгебра та аналітична геометрія, часто геодезія надає для аналізу координати «опорних» точок. Аналіз фотозображення протікає в два етапи : 1) попередня обробка зображень (отримала потужний поштовх з впровадженням ЕОМ); 2) методи побудов моделей для оцінки розмірів та положень тіл (проекції, зйомка під кутом, аналіз стереозображень тощо). З фізики залучаються знання з геометричної оптики (об'єктиви, фототехніка) та електроніки (світлочутлива ПЗС матриця, схемні рішення). При методі фотограмметрії застосовуються спеціальні системи координат – геодезична, права система прямокутних координат, фотограмметрична ліва просторова прямокутна система; вводять координатну систему знімку (в площині). Оцінка розмірів тіл залежить від перетворень координат між цими системами; окремий випадок складає нахилений фотознімок. Для аерознімання використовують аерофотоапарат, на поверхні – фототеодоліт, масові цифрові камери [2] [5]. Існують програми для оцінки довжин та кутів нахилу предметів за допомогою смартфонів, що доступно й професіоналам для роботи та учням для навчання. Застосування фотограмметрії можливе й для проектування машин і механізмів. Відома програма Realviz, яка по декількох фотографіях тіла знятих в проекціях, будує низку опорних точок, які імпортують контури в тривимірне креслення.

Для потреб навчання фотовідеотехніка, зокрема цифрова, застосовується найбільш інтенсивно останні 10–15 років, стимулюючи інтерес до предметів та розвиваючи самостійність учнів. Застосування цих методик особливо продуктивно в лабораторних заняттях інженерно-фізичного циклу. Я. Філіпова [6] проаналізувавши програми Multilab (програмне забезпечення цифрової лабораторії «Архімед», виробник Fourier Sys, Ізраїль) і Measure Dynamics (програмне забезпечення цифрової лабораторії Cobra4, виробник Pnywe, Німеччина), також ImageJ (США) для аналізу рухів, дійшла до висновку, що всі вони при відеоаналізі фізичного руху використовують послідовні етапи: зйомку відеоматеріалу, процедуру масштабування, розмітку відеофрагменту і математичну обробку отриманих результатів. Класичні методи фотограмметрії застосовуються й для оцінки розмірів по

нерухомих знімках. Перспективними тут є засоби фотограмметрії стосовно практики лабораторних занять, яким притаманна наочність – механіка й оптика.

Порівняно з раннім етапом розвитку оцінкових фотометодів (і навчальних курсів з цієї дисципліни) де панує лінійна алгебра, аналітична геометрія та елементи інженерної графіки (нарисна геометрія), при впровадженні ЕОМ зросла питома вага методів цифрової фільтрації («передобробка»). Останні розпадаються на безпосереднє маніпулювання пікселями («просторові методи») та застосування модифікацій зображень з переводом їх у систему періодичних функцій з подальшою обробкою методами рядів Фур'є («частотні методи»). Є й фільтри засновані на статистичних методах. Ці методи мають бути ураховані при розробці математичних та інженерно-фізичних курсів для спеціалістів в галузі фотограмметрії та фотоаналізу [2] [4].

**Висновки.** Фотограмметричні методи знаходять застосування в системах безконтактного моніторингу навколишнього середовища для штучних та природних систем, оцінки їх візуальних властивостей. Вони використовуються також в навчальному процесі школи, коледжу, технічного університету знаходять своє застосування в дослідженнях форми тіл та їх рухів, в гідродинаміці й оптиці, в основному в рамках інженерно-фізичних дисциплін.

#### Список використаних джерел

1. Дорожинський О. Л., Тукай Р. Фотограмметрія. Львів: Львівська політехніка, 2008. 332 с.
2. Краснящих А.В. Обработка оптических изображений. Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2012. 129 с.
3. Рудий Р.М. Прикладна фотограмметрія. Київ: НМКВО, 1991. 172 с.
4. Старовойтов В.В., Голуб Ю.И. Получение и обработка изображений на ЭВМ. Минск: БНТУ, 2018. 204 с.
5. Толстохатко В. А. Пеньков В. О.; Конспект лекцій з курсу «Фотограмметрія та дистанційне зондування». Модуль 1: «Фотограмметрія» для студентів 3 курсу денної та заочної форм навчання за напрямом 6.080101 «Геодезія, картографія та землеустрій». Харків: ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 2013. 91 с.
6. Филиппова И.Я. Видеоанализ как современный инструмент учителя физики. URL: [http://ifets.ieee.org/russian/depository/v15\\_i1/pdf/7.pdf](http://ifets.ieee.org/russian/depository/v15_i1/pdf/7.pdf) (12.03.2021).

**Мусієнко І. І.**

молодший науковий співробітник,

**Холодов Р. І.**

доктор фізико-математичних наук,

старший науковий співробітник,

Інститут прикладної фізики НАН України,

м. Суми, Україна

*igormusienko2017@gmail.com*

### ВПЛИВ РЕЗОНАНСНИХ УМОВ НА СТРУМ ПОЛЬОВОЇ ЕМІСІЇ З ДВОШАРОВОЇ ПОВЕРХНІ МЕТАЛУ

Задача регулювання величини струму польової емісії є актуальною, зокрема, для подолання високовакуумних високоградієнтних пробів і одержання градієнтно стійких матеріалів до виникнення електричного розряду у складових частинах сучасних прискорювачів. Польова емісія – явище, характерне для сильних полів з електричною напруженістю  $E = 10^8 \div 10^{10}$  В/м, є однією з основних причин, що призводить до появи темнових струмів у прискорювальних структурах і, як наслідок, втрати електроізоляційних властивостей міжелектродного проміжку. З іншого боку процес підсилення струму

польової емісії є необхідним для роботи польових електронних джерел, вимог тунельної мікроскопії, електронної голографії, вакуумної наноелектроніки [2, 5, 6].

**Метою дослідження** є врахування впливу резонансних ефектів на густину струму польової емісії за допомогою моделі двоступеневого потенціального бар'єру; знаходження виразу для коефіцієнта прозорості потенціального бар'єру та чисельне обчислення струму польової емісії; з'ясування зв'язку відстані між сходинками потенціального бар'єру з довжиною хвилі де Бройля тунелюючого через бар'єр електрона.

Двоступенева форма потенціального бар'єру була запропонована в роботах [1, 3, 7]. У статті [3] теоретично описано низьковольтну польову емісію електронів з наноструктурованих вуглецевих матеріалів, обумовлену наявністю резонансних поверхневих станів, і виконано чисельну оцінку емісійного струму, що підтверджує можливість збільшення на чотири порядки за рахунок резонансного тунелювання електронів через подвійний бар'єр.

Основна ідея запропонованої моделі базується на тому, що електрони проникають через два прямокутні потенціальні бар'єри завдяки ефекту тунелювання. При необхідному підборі параметрів системи, показаної на рис. 1, ймовірність проходження електрона з енергією  $W$  крізь двоступеневий потенціальний бар'єр може виявитися вищою, ніж у випадку одноступеневого бар'єру, тобто відбуватиметься резонансне тунелювання [1].

На рис. 1 зображено спрощену форму потенціального бар'єру для системи метал-метал-вакуум. Кожна з областей означає: V – перший метал, IV – дипольний шар контакту метал-метал, III – другий метал, II – потенціальний бар'єр на межі розділу фаз метал-вакуум, I – вакуум. Область II є кількісною заміною трикутного бар'єру прямокутним з рівною йому прозорістю. Координати  $x_i$  є межами розділу вказаних областей. Параметри  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  моделі є шириною областей II, III, IV відповідно. Нумерація нижнього індекса хвильових чисел  $k_i$  співпадає з номером кожної області. За умови  $h_i = 0$ , де  $i=1,2,3$ , двоступеневий прямокутний потенціальний бар'єр стає одноступеневим. Величина  $C = \mu + \chi$ , де  $\mu$  – електростатичний потенціал металу,  $\chi$  – робота виходу металу.

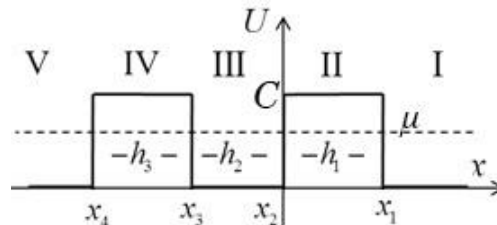


Рис. 1. Двоступеневий прямокутний потенціальний бар'єр

Умову абсолютної прозорості двоступеневого потенціального бар'єру  $D = 1$  у частковому випадку з врахуванням:

$$h_1 = h_3 = h, W = C/2. \quad (1)$$

можна записати як:

$$h_2 = \frac{\pi}{2k_1}(2n + 1), n = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

Оскільки довжина хвилі де Бройля електрона  $\lambda_D = 2\pi/k_1$ , то

$$h_2 = \frac{\lambda_D}{4}(2n + 1), n = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

За умови енергії електрона  $W = 6 \text{ eV}$ , маємо  $\lambda_D = 5 \text{ \AA}$ , і, використовуючи (3),  $h_2 = 1,25 \text{ \AA}$ . Формула (3) не обмежує узагальнення абсолютної прозорості двоступеневого потенціального бар'єру лише за умов (1) тому, що вона правильна й для інших значень  $C$  і  $W$ , проте коефіцієнт прозорості буде максимальним, але меншим одиниці. Введення (1)

необхідно, щоб знайти формулу (3) і спростити аналітичний вираз для коефіцієнта прозорості  $D$  бар'єру, зображеного на рис. 1.

Отже, знайдено формулу для коефіцієнта прозорості  $D$  електронів та умову (1), що визначає випадки збільшення прозорості розглянутого потенціального бар'єру. Для одержання найбільшого значення струму польової емісії необхідна товщина  $h_2$  нанесеного металу на поверхню підкладки має дорівнювати одній четвертій довжини хвилі де Бройля електрона, аналогічно як для просвітлення оптики [4]. Як видно з рис. 2, затухання осциляцій густини струму  $j$  узгоджується з формулою (3). Для побудови рис. 2 були використані параметри:  $h_1 = 6 \cdot 10^{-10}$  м,  $h_3 = 10^{-10}$  м,  $C = 12$  еВ,  $\mu = 7,5$  еВ.

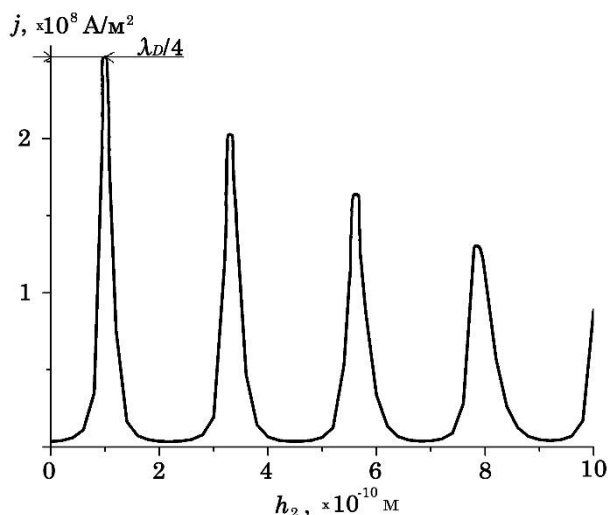


Рис. 2. Залежність густини струму  $j$  від ширини області  $h_2$  у випадку форми бар'єру, зображеної на рис. 1

Таким чином, покриття електропровідного металевого середовища додатковим шаром металу товщиною порядку частки нанометра збільшує ймовірність проходження та зменшує розкид по енергії електронів польової емісії в області абсолютної прозорості двоступеневого потенціального бар'єру в порівнянні з прямокутним одноступеневим.

#### Список використаних джерел

1. Антонов Д.А., Вугальтер Г.А., Горшков О.Н., Касаткин А.П., Филатов Д.О., Шенина М.Е. Резонансное туннелирование электронов через нанокластеры, сформированные в стабилизированном диоксиде циркония методом ионной имплантации. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*, 2007. №3. С. 55-60.
2. Владимиров Г.Г. *Физическая электроника. Эмиссия и взаимодействие частиц с твердым телом* : учеб. пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2013. 368 с.
3. Захидов А.А., Образцов А.Н., Волков А.П., Ляшенко Д.А. Механизм низковольтной эмиссии электронов из наноуглеродных материалов. *ЖЭТФ*, 2005. Выпуск 1(127). С. 100-106.
4. *Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика* : в 3 т. / под ред. Г.С. Ландсберга. Москва: Физматлит, 2009. Т. 3. 656 с.
5. Месяц Г.А. *Взрывная электронная эмиссия* : монография. Москва: Физматлит, 2011. 280 с.
6. Фурсей Г.Н. *Автоэлектронная эмиссия* : учеб. пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2012. 320 с.
7. Musiienko I.I., Kholodov R.I. Influence of vacancies and pores that appear during irradiation in the surface metal layer on field emission current. *J. Nano- Electron. Phys.*, 2019. No 3(11). 03015(5pp). DOI: 10.21272/jnep.11(3).03015

**Недорешта В. М.**  
науковий співробітник,  
**Ворошило О. І.**  
старший науковий співробітник,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, України  
*nedorshhta@ukr.net*

## РЕЗОНАНСНА КІНЕМАТИКА РОЗСІЯННЯ ЕЛЕКТРОНІВ ТА ФОТОНІВ ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ В СИЛЬНОМУ ЛАЗЕРНОМУ ПОЛІ

Основні результати досліджень для процесів квантової електродинаміки (КЕД) в сильних світлових полях систематизовані в роботі [1]. В даній роботі розглядатимуться резонансні умови для процесу розсіяння фотона на електроні. При цьому процес буде вивчатися в полі плоскої монохроматичної хвилі з напрямком уздовж осі  $z$  з 4-потенціалом  $A(\phi) = (F/\omega)(e_x \cos \phi + \delta \cdot e_y \sin \phi)$ ,  $\phi = kx = \omega(t - z)$ ,  $\delta = \pm 1$ ,  $e_{x,y} = (0, \mathbf{e}_{x,y})$ ,  $k = (\omega, \mathbf{k})$ .

Розглядається випадок ультрарелятивістських енергій електрона і гамма-кванта, коли і початкові і кінцеві частинки летять у вузькому конусі:

$$\begin{cases} \theta_i = \angle(\mathbf{k}_i, \mathbf{p}_i) \ll 1 \\ \theta_f = \angle(\mathbf{k}_f, \mathbf{p}_f) \ll 1 \end{cases} \quad \theta_{\text{кр}_i} = \angle(\mathbf{k}, \mathbf{p}_i) \approx \theta_{\text{кр}_i} = \angle(\mathbf{k}, \mathbf{k}_i) \equiv \bar{\theta}_i \ll 1. \quad (1)$$

У цьому випадку напрямок поширення хвилі лежить далеко від заданого вузького конуса частинок, інакше резонанси зникають. Таким чином, енергії електронів і фотонів повинні задовольняти умовам

$$\frac{\tilde{E}_j}{m_*} \approx \frac{E_j}{m_* \sqrt{1+\eta^2}} \left[ 1 + \left( \eta \frac{m}{2E_j} \right)^2 \frac{1}{\sin^2(\theta_j/2)} \right] \ll \begin{cases} E_j/m \gg 1, & \text{if } \eta \ll 1 \\ E_j/(\eta m) \gg 1, & \text{if } \eta \gg 1 \end{cases} \quad (2)$$

Тут  $m_* = m\sqrt{1+\eta^2}$  - ефективна маса електрону в плоскому хвильовому полі,  $\eta$  - класичний релятивістсько-інваріантний параметр, який чисельно дорівнює відношенню роботи поля на довжині хвилі до енергії спокою електрона.

З другої умови (2) отримуємо обмеження на максимальну інтенсивність лазерної хвилі  $\eta \ll \eta_{\text{max}}$ ,  $\eta_{\text{max}} = E_j/m \gg 1$  або  $\eta_{\text{max}} = \omega_j/m \gg 1$ . Оцінки показують, що для енергій частинок  $\ll 100 \text{ GeV}$ :  $\eta \ll \eta_{\text{max}} \ll 10^5$  або для інтенсивності лазерної хвилі  $I \ll I_{\text{max}} \ll 10^{28} \text{ W/cm}^2$ . Таким чином, подальший розгляд буде справедливим для достатньо великих інтенсивностей хвиль.

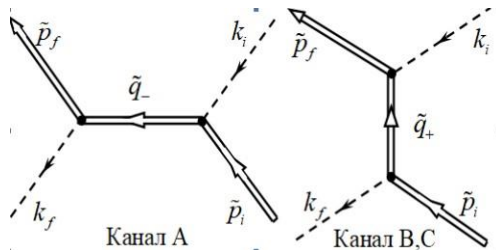


Рис. 1. Прямі та обмінні діаграми Фейнмана для Комптон-ефекту

Процес розсіяння гамма-кванта на електроні в лазерному полі описується двома діаграмами Фейнмана (див. рис. 1). Відзначимо, що для прямої діаграми (канал А) проміжна частинка - електрон, а для обмінної - електрон (канал В) або позитрон (канал С). На рис.1  $\tilde{p}_i = (\tilde{E}_i, \tilde{\mathbf{p}}_i)$  і  $\tilde{p}_f = (\tilde{E}_f, \tilde{\mathbf{p}}_f)$  - це 4-квазіімпульси початкового і кінцевого електронів,  $\tilde{q}_{\pm}$  - 4-квазіімпульси проміжного електрона і позитрона,  $k_i = (\omega, \mathbf{k}_i)$  и  $k_f = (\omega, \mathbf{k}_f)$  - 4-імпульси вихідного та кінцевого фотона.



$$\tilde{p}_i + k_i = \tilde{q}_- + rk \quad (1), \quad \tilde{p}_f + k_f = \tilde{q}_- + r'k \quad (2), \quad r, r' \geq 1 \quad (3)$$

В умовах резонансу проміжний електрон виходить на масову оболонку  $\tilde{q}_-^2 = m_*^2$ . Завдяки цьому процес другого порядку ефективно зводиться до двох процесів першого порядку. З огляду на умови (1), (2) з співвідношень (3) можна отримати кут розчину початкових частинок в одиницях  $E_i/m_*$  ( $\delta_{\eta_i} = E_i \theta_i / m \sqrt{1 + \eta^2}$ ):

$$\delta_{\eta_i}^2 = \left( \frac{r}{r_{\eta c}} - 1 \right), \quad r_{\eta c} = \frac{m^2 (1 + \eta^2)}{4\omega E_c \sin^2(\bar{\theta}/2)}, \quad E_c = \frac{E_0 E_i}{\omega_i}, \quad E_0 = E_i + \omega_i, \quad (4)$$

і кубічне рівняння для енергії кінцевого електрона:

$$x_f^3 \delta_{\eta f}^2 - x_f^2 \delta_{\eta f}^2 + x_f \left( \frac{r'}{r_{\eta 0}} + 1 \right) - 1 = 0, \quad x_f = \frac{E_f}{E_0}, \quad \delta_{\eta f} = \frac{E_0 \theta_f}{m_*}, \quad \theta_f = \angle(\mathbf{k}_f, \mathbf{p}_f) \ll 1, \quad (5)$$

З виразу (4) видно, що число фотонів, які випромінюються в першій вершині має перевищувати деяке мінімальне значення  $r \geq r_{\eta c \min}$ . Тут  $r_{\eta c \min} = [r_{\eta c}]$  – ціла частина числа  $r_{\eta c}$ . Мінімальна кількість фотонів залежить від комбінаційної енергії початкових частинок, а також від параметрів експериментальної установки. Наприклад, для зустрічного руху електронного пучка і лазерної хвилі  $\omega = 1 \text{ eV}$  для енергій початкових частинок  $E_i = \omega_i = 62.5 \text{ GeV}$  резонансний процес має місце при великій кількості поглинутих фотонів хвилі  $r \ll [\eta^2] \gg 1$ .

Аналіз виразу (5) показує, що резонансна енергія істотно залежить від кількості поглинутих фотонів хвилі. Якщо  $r_{\eta \min} \in r' \leq 8r_{\eta \min}$ , то резонансна енергія має одне значення для кожного кута виходу спонтанного фотона. Якщо кількість поглинутих фотонів  $r > 8r_{\eta \min}$ , то кількість можливих значень резонансної енергії істотно залежить від кута вильоту гамма-кванта щодо кінцевого електрона. Отже, для кутів, укладених в інтервал  $3(r'/r_{\eta 0} + 1) < \delta_{\eta f}^2 \leq \delta_{\eta f(-)}^2$ ,  $\delta_{\eta f(+)}^2 \leq \delta_{\eta f}^2 < \infty$  маємо одне рішення, а для кутів, укладених в інтервал  $0 < \delta_{\eta f}^2 \leq 3(r'/r_{\eta 0} + 1)$  – для кожного кута вильоту фотона є три можливих резонансних енергії (див. рис.2).

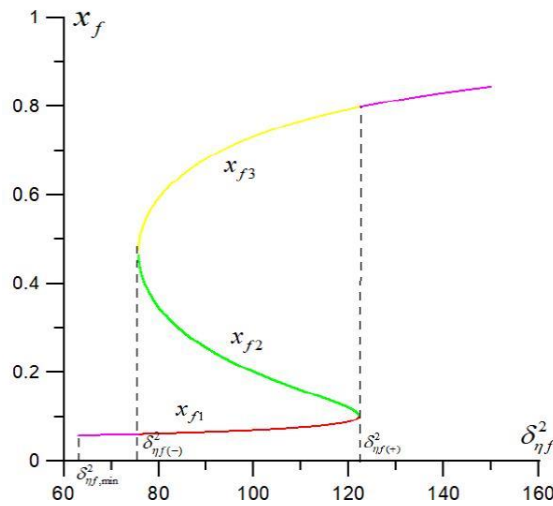


Рис. 2 Графік залежності енергії кінцевого електрона (в одиницях початкової енергії) від параметра  $\delta_{\eta f}^2$  для кількості фотонів хвилі  $r' = 20$ .

#### Список використаних джерел

1. С.П.Рощупкин, А.И. Ворошило. Резонансные и когерентные эффекты квантовой электродинамики в световом поле. Київ, вид-во Наукова думка, 2008.

Новак О. П.

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
novak-o-p@ukr.net

## ІОНІЗАЦІЯ К-ОБОЛОНКИ ВАЖКОГО ІОНА КОРОТКИМ ЛАЗЕРНИМ ІМПУЛЬСОМ

В даній роботі теоретично досліджено явище фотоіонізації електронів з К-оболонки воднеподібного іона шляхом чисельного розв'язку нестационарного рівняння Дірака [1, 2]. Обчислено імовірність процесу для короткого лазерного імпульсу в дипольному наближенні. Форма імпульсу задана за допомогою векторного потенціалу (надалі використовується атомна система одиниць,  $e = \hbar = m = 1$ ) [3]:

$$A = \frac{\alpha E_0}{\omega} \sin^2 \left( \frac{\pi t}{\tau} \right) \sin(\omega t + \phi), \quad (1)$$

де  $\alpha$  — стала тонкої структури,  $\tau$  — тривалість імпульсу,  $T = 2\pi/\omega$  — оптичний період,  $E_0$  визначає амплітуду поля.

Для легких ядер та малих інтенсивностей лазерного випромінювання імовірність також обчислено аналітично в рамках нерелятивістської теорії збурень [4]. В першому наближенні теорії збурень дозволені переходи електрона з основного рівня в стани неперервного спектру з орбітальним квантовим числом  $l = 1$ :

$$dw = \frac{2^9 f(k/Z)}{3Z^4(1 + (k/Z)^2)^5} \left| \int_{-\infty}^t E(t) e^{i\omega_{fi}t} dt \right|^2 k dk \quad (2)$$

$$f(x) = \frac{\exp \left[ -4 \frac{\text{arctg}(x)}{x} \right]}{1 + \exp(-\frac{2\pi}{x})} \quad (3)$$

де  $\omega_{fi} = \mathcal{E} - \mathcal{E}_{1s}$ ,  $\mathcal{E}_0 = -Z^2/2$  — енергія основного стану,  $k$  — хвильовий вектор.

Окремо розглянуто випадок лазерного імпульсу у формі монохроматичного цуга постійної інтенсивності, тривалість якого дорівнює цілому числу періодів.

Для зручності порівняння іонізації іонів різних елементів, напруженість поля лазера та його частота вказані у відносних одиницях:

$$\omega' = 2\mathcal{E}_{bind}, \quad E' = \frac{3Z\alpha}{\langle r^2 \rangle} \quad (4)$$

де  $\mathcal{E}_{bind}$  — енергія зв'язку основного стану,  $\langle r^2 \rangle$  — середній квадрат радіальної координати електрона в основному стані. Значимо, що для  $Z = 1$  дані одиниці співпадають з атомними.

Як видно з рис. 1, у випадку низької напруженості поля чисельні розрахунки добре узгоджуються з передбаченням теорії збурень як для легких іонів аргону ( $Z=18$ ), так і для радону ( $Z=86$ ), за умови масштабування напруженості та частоти релятивістськими виразами  $\omega'$ ,  $E'$ . Імовірність іонізації при цьому має максимум поблизу значення енергії фотону лазерної хвилі, що дорівнює енергії зв'язку електрона.

При збільшенні напруженості поля (рис. 1) ширина максимуму збільшується, з'являється відхилення для іонізації радону порівняно з кривою аргону, та з'являються осциляції в області багатофотонної іонізації,  $\omega < \mathcal{E}_{bind}$ .

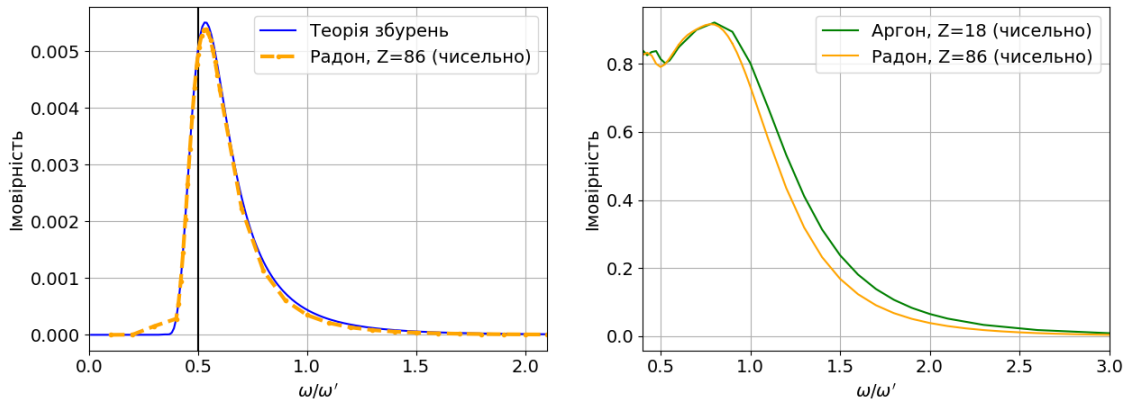


Рис. 1. Залежність повної імовірності іонізації від частоти для напруженості поля  $0.01E'$  (зліва) та  $1.0E'$  (справа). Тривалість лазерного імпульсу — 5 оптичних періодів.

Зазначимо, що в області  $\omega < \mathcal{E}_{bind}$  для іонізації монохроматичним цугом за умови  $\tau \gg T$  повна імовірність процесу не залежить від тривалості імпульсу (рис. 2). Якісне пояснення даного ефекту полягає в багатофотонному характері іонізації за низьких частот випромінювання. При цьому імовірність в одиницю часу каскадних процесів обернено пропорційна часу спостереження [5].

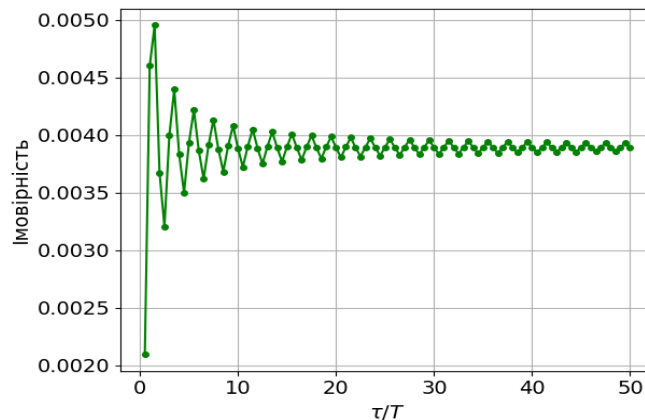


Рис. 2. Залежність імовірності іонізації цугом від тривалості імпульсу в багатофотонному режимі. Частота  $0.2\omega'$ , напруженість поля  $0.1E'$ . Результат теорії збурень.

#### Список використаних джерел

1. McConnell S. R., Artemyev A. N., Mai M. and Surzhykov A. Solution of the two-center time-dependent dirac equation in spherical coordinates: Application of the multipole expansion of the electron-nuclei interaction. *Phys. Rev. A*, 86:052705, 2012.
2. Shabaev V.M., Tupitsyn I. I., Yerokhin V. A, Plunien G., and Soff G.. Dual kinetic balance approach to basis-set expansions for the dirac equation. *Phys. Rev. Lett*, 93(13):130405, 2004.
3. S. Selstø , E. Lindroth, and J. Bengtsson. Solution of the dirac equation for hydrogenlike systems exposed to intense electromagnetic pulses. *Phys. Rev. A*, 79:043418, 2009.
4. D. Dimitrovski. Time-dependence of ionization and excitation by intense, short electric pulses. PhD thesis, Fakultät für Mathematik und Physik der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, Germany, 2005.
5. О. П. Новак. Імовірність електромагнітних каскадів. Матеріали I Міжрегіональної науково-практичної конференції молодих учених СПЕТФ2012, м. Суми, 2012.

**Обухов О. А.**  
науковий співробітник,  
Науково-дослідний центр ракетних військ і артилерії,  
Суми, Україна  
*obukhov.olexii@gmail.com*

## **ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ОБТІКАННЯ РЕАКТИВНИХ СНАРЯДІВ ПОВІТРЯНИМ ПОТОКОМ**

З розвитком високопродуктивної комп'ютерної техніки та програмного забезпечення імітаційного моделювання процесів обтікання навколо засобів ураження (снарядів ствольної артилерії та реактивних снарядів (РС) реактивних систем залпового вогню (РСЗВ)), реалізованих в комерційних програмних комплексах, таких як: Ansys CFX, Ansys Fluent, STAR-CD, FlowVision HPC, Open FOAM – з'явилась можливість зменшити кількість експериментів в аеродинамічних трубах та випробувальних пусків на полігонах, замінивши їх комп'ютерним моделюванням. Як результат, життєвий цикл та собівартість створення нових або модернізація вже існуючих засобів ураження можливо зменшити. Крім того, комп'ютерне моделювання дозволяє отримати повну картину обтікання, адже існує певна кількість параметрів, наприклад: сил діючих на об'єкт дослідження чи параметрів потоку повітря навколо досліджуваного об'єкту – які зазвичай неможливо отримати через особливості умов проведення випробувань. Так, наявність засобів кріплення об'єкта дослідження до елементів конструкції аеродинамічної труби унеможливило вимірювання параметрів потоку під час досліджень внаслідок акустичного ефекту або однозначне визначення впливу донного спротиву за умов, коли кріплення виконано до донного перерізу об'єкта дослідження. На додаток, для максимального детального вивчення поведінки певного РС необхідно мати експериментальну лабораторію, яка б дозволяла досліджувати дозвуків та надзвуків режими обтікання, а також обтікання з певним кутом атаки в усіх необхідних площинах.

Вищезазначені особливості експериментального дослідження невластиві комп'ютерному моделюванню, адже методологічно відсутня необхідність допоміжних інженерних конструкцій, що максимально наближає моделювання до реальних умов польоту досліджуваних об'єктів. Таким чином, використовуючи методику імітаційного комп'ютерного моделювання процесів обтікання реактивних снарядів повітряним потоком, було детально досліджено проблему динаміки снарядів для реактивних систем залпового вогню залежно від масива вхідних параметрів системи.

**Овчаренко А. Ю.**  
інженер II категорії,  
**Лебедь О. А.**  
кандидат фізико-математичних наук,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
*oartturr@gmail.com*,

## **АНАЛІТИЧНИЙ ОПИС ФОРМУВАННЯ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ФАЗОКОНТРАСТНОГО ЗОБРАЖЕННЯ**

Метод рентгенівського фазового контрасту для дослідження внутрішньої структури різних об'єктів набув широкого застосування у різних областях науки і техніки. Значну потребу в цьому має галузь медицини, де для діагностики захворювань існує необхідність у отриманні внутрішньої структури біологічних об'єктів.

Існує велика кількість методик реалізації рентгенівського фазового контрасту, проте найбільш поширеним є метод лінійного фазового контрасту. Схема установки даного методу потребує лише джерело, об'єкт дослідження та детектор. В основі цього методу лежить проходження рентгенівських променів через досліджуваний об'єкт та їх поширення на певній відстані між об'єктом і детектором. В результаті проходження рентгенівських променів через об'єкт, відбувається їх заломлення та виникнення дифракційної картини на детекторі. На основі інформації про дифракційну картину, одержується інформація про показники заломлення та внутрішню структуру об'єкта дослідження [1].

Для опису процесу дифракції рентгенівського випромінювання внаслідок взаємодії з досліджуваним зразком, одним із найважливіших етапів є аналітичний розрахунок результату дифракції на детекторі. В загальному випадку результат дифракції можна представити у вигляді рівняння:

$$\psi_{\omega}(x, y, z = \Delta) = D_{\Delta} \psi_{\omega}(x, y, z = 0),$$

Де  $D_{\Delta}$  – дифракційний оператор,  $\Delta$  – відстань поширення хвильового фронту,  $\psi_{\omega}(x, y, z)$  – просторовий розподіл напруженості електричного поля рентгенівського випромінювання.

Для розрахунку дифракційної картини, тобто розподілу  $\psi_{\omega}(x, y, z = \Delta)$ , необхідно зробити наступне: 1) застосувати перетворення Фур'є для вхідної хвилі  $\psi_{\omega}(x, y, z = 0)$  у координатах  $x$  і  $y$ ; 2) помножити результат на пропагатор вільного поширення:  $\exp\left\{i\Delta\sqrt{k^2 - k_y^2 - k_x^2}\right\}$ ; 3) застосувати обернене перетворення Фур'є з результуючого виразу по відношенню до складових хвильового вектора  $k_x$  і  $k_y$  [2]. Таким чином, дифракційний оператор може бути представлений в наступному вигляді:

$$D_{\Delta} = F^{-1} \exp\left[i\Delta\sqrt{k^2 - k_y^2 - k_x^2}\right] F.$$

У випадку, коли відстань поширення хвилі  $D_{\Delta} = 0$ , то дифракційний оператор буде рівним одиниці, тим самим задовольняючи умову узгодженості.

Розглянемо розрахунок частинного випадку – дифракції Френеля [3]. Приймаючи до уваги, що рентгенівські промені є параксіальними і компоненти хвильового вектора  $k_x$  та  $k_y$  набагато менші за  $|k|$ , справедливим є наступне біноміальне наближення:

$$\sqrt{k^2 - k_y^2 - k_x^2} \approx k - \frac{k_y^2 + k_x^2}{2k},$$

тому дифракційний оператор спрощується до вигляду:

$$D_{\Delta} \approx D_{\Delta}^{(F)} = \exp(ik\Delta) F^{-1} \exp\left[\frac{-i\Delta(k_x^2 + k_y^2)}{2k}\right] F.$$

Підставляючи дифракційний оператор у загальне рівняння для дифракції, одержимо дифракційний інтеграл Френеля в операторній формі:

$$\begin{aligned} \psi_{\omega}(x, y, z = \Delta) &\approx D_{\Delta}^{(F)} \psi_{\omega}(x, y, z = 0) = \\ &= \exp(ik\Delta) F^{-1} \exp\left[\frac{-i\Delta(k_x^2 + k_y^2)}{2k}\right] F \psi_{\omega}(x, y, z = 0). \end{aligned}$$

Беручи до уваги те, що реальні об'єкти мають досить складну внутрішню структуру і різні показники заломлення, процеси дифракції внаслідок взаємодії з ними є складним явищем. Слід зазначити, що даний вираз має аналітичний розв'язок лише в деяких простих випадках. Таким чином, достовірність результатів розрахунків цілком повністю залежить від допустимості наближень та спрощень, використаних у конкретному випадку. Значний інтерес представляє пошук наближених методів розрахунку дифракції рентгенівських променів та їх узгодження з експериментальними даними.

### Список використаних джерел

1. On the possibilities of x-ray phase contrast microimaging by coherent high-energy synchrotron radiation / A. Snigirev та ін. *Review of Scientific Instruments*. 1995. Т. 66, № 12. С. 5486-5492. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1146073>
2. Paganin D. *Coherent x-ray optics*. Oxford University Press, 2013. 424 с.
3. Сивухин Д.В. *Общий курс физики, т.4 Оптика*. М.: Физматлит, 2005. 792 с.

**Овчаренко Ю. М.**

кандидат фізико-математичних наук, доцент,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м.Суми, Україна  
[ovyu@ukr.net](mailto:ovyu@ukr.net)

### ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЛАВІВ Fe-Cu, Fe-Ni ТА Fe-Cu-Ni МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНОЇ ДИНАМІКИ

У даній роботі методами класичної молекулярної динаміки проведені дослідження механічних властивостей та процесів руйнування зразків Fe-Cu, Fe-Ni та Fe-Cu-Ni під дією деформації розтягування при різних температурах. Моделювання фізичних процесів, які відбуваються у досліджуваних матеріалах при їх деформації, проводилося за допомогою програмованого програмного пакету LAMMPS [1]. У ході виконання роботи були розроблені: 1) ЕАМ-потенціали міжатомної взаємодії для сплавів Fe-Cu, Fe-Ni та Fe-Cu-Ni у рамках методу зануреного атома, необхідні для проведення моделювання; 2) програмні коди для автоматичного генерування сценаріїв LAMMPS і здійснення комп'ютерних експериментів з деформації зразків. Візуалізація структурних змін у кристалах проводилася за допомогою програми OVITO [2].

На рисунку 1 показані типові залежності механічної напруги від деформації у сплавах Fe-1.34%Cu-1%Ni при різних температурах.

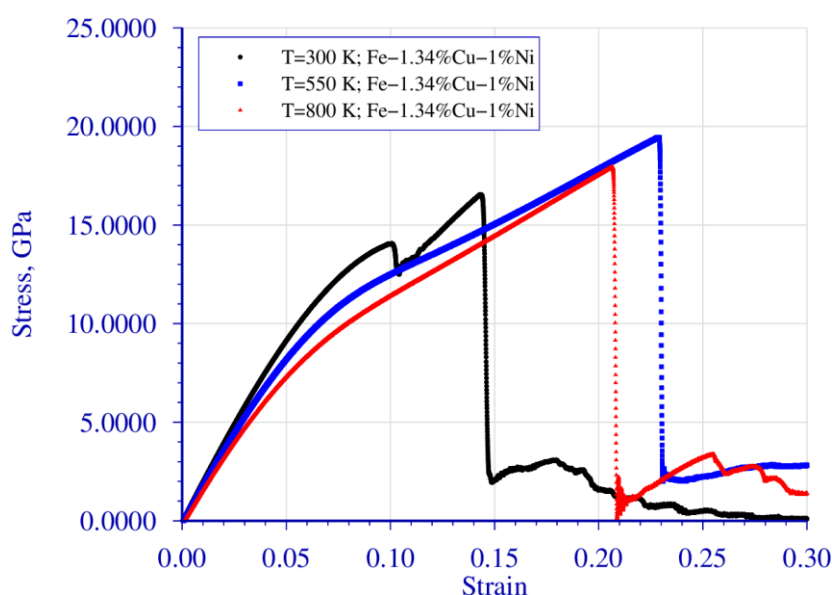
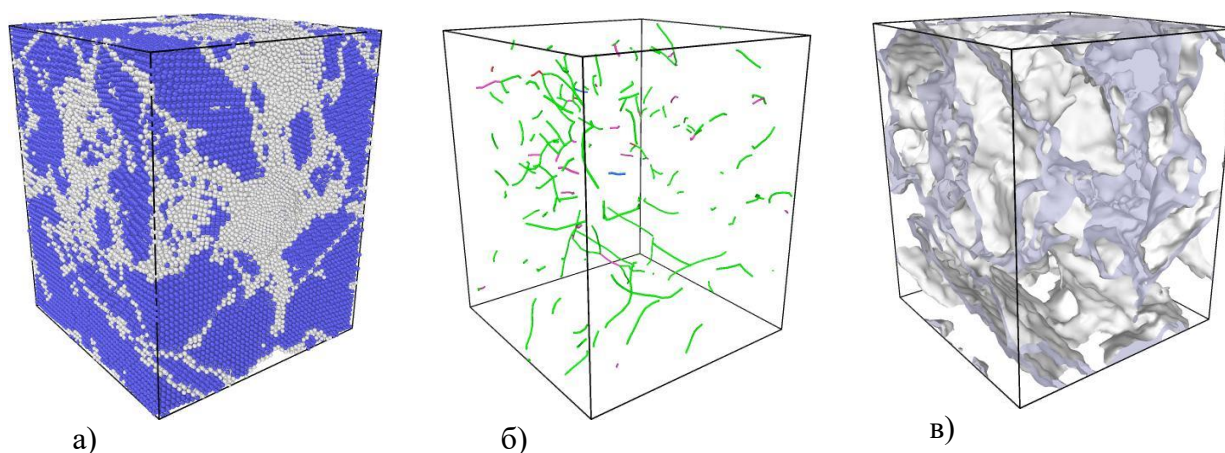


Рис. 1. Залежність механічної напруги від деформації у сплавах Fe-1.34%Cu-1%Ni при різних температурах (кількість атомів кристала 221184)

Одержані нами результати вказують на те, що при кімнатних температурах, у порівнянні з більш високими температурами, значно зменшується область пластичної деформації, що свідчить про можливість виникнення в'язко-крихкого фазового переходу матеріалів. Встановлено, що основним механізмом руйнування зразків досліджуваних сплавів є виникнення та рух крайових дислокацій. На рисунку 2 показана структура, дислокаційна сітка та області дефектів, які виникають при деформації розтягування у сплавах Fe-1.34%Cu-1%Ni при температурі 550 К на стадії руйнування зразка. Світло-сірі області на рисунку 2а – це області, де кристалічна решітка вже зазнала руйнування внаслідок деформації. Ці області узгоджуються з показаними на рисунку 2в областями дефектів у вигляді мікропор. Крайові дислокації (рисунок 2б), які виникають при деформації, розташовані у незруйнованих областях кристала і починаються та закінчуються на поверхнях областей дефектів.



*Рис. 2. Структура (а), дислокаційна сітка (б) та області дефектів (в), які виникають при деформації розтягування у сплавах Fe-1.34%Cu-1%Ni при температурі 550 К на стадії руйнування зразка (кількість атомів кристала 221184)*

У даній роботі було встановлено, що концентрація домішок та компонентний склад досліджуваних сплавів призводить до зміщення межі міцності матеріалів та зміни ширини області в'язкої деформації.

Відомо, що в умовах радіаційного опромінення у конструкційних матеріалах атомних електростанцій відбуваються структурні зміни у вигляді виникнення кластерів точкових дефектів, преципітатів, пор та ін., що безпосередньо призводить до зміни механічних характеристик матеріалів. Це свідчить про можливість використання результатів даної роботи для проектування нових конструкційних матеріалів, для вивчення впливу радіаційних пошкоджень сплавів, для визначення критичної температури в'язко-крихкого переходу конструкційних матеріалів атомних електростанцій, що є надзвичайно важливим при продовженні терміну експлуатації атомних реакторів та розробки реакторів нового покоління.

#### Список використаних джерел

1. <https://lammmps.sandia.gov/index.html>
2. <https://www.ovito.org>

**Острик В. І.**

доктор фізико-математичних наук, професор,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
v.i.ostryk@gmail.com

## МЕТОД ПРОДОВЖЕННЯ КРАЙОВИХ УМОВ У ЗАДАЧАХ ТЕОРІЇ ПРУЖНОСТІ

Для знаходження розв'язків плоских задач теорії пружності в областях, які обмежені двома парами різних координатних ліній, пропонується використовувати розв'язки більш простих задач для областей, обмежених однією парою координатних ліній, із додатковим заданням крайових умов вихідної задачі за межами області. Метод ілюструється знаходженням розв'язків наступних крайових задач теорії пружності для чвертьплощини, півсмуги та прямокутника.

1. На межі пружної чвертьплощини  $0 \leq x < \infty$ ,  $0 \leq y < \infty$  задано нормальні та дотичні напруження, тобто зформульовано першу крайову задачу теорії пружності для чвертьплощини. Чвертьплощина розглядається як граничний випадок прямокутника, коли дві його суміжні сторони віддалені на нескінченність. Розв'язок цієї задачі відшукується у формі розв'язку першої крайової задачі для півплощини  $-\infty < x < \infty$ ,  $0 \leq y < \infty$  через комплексні потенціали Колосова – Мухелішвілі [3]. Крайові функції з променя  $0 \leq x < \infty$ ,  $y = 0$  продовжуються на промінь  $-\infty < x < 0$ ,  $y = 0$  та вважаються невідомими. Для їх знаходження шляхом задоволення крайових умов на промені  $0 \leq y < \infty$ ,  $x = 0$  отримано комплексне інтегральне рівняння типу згортки Мелліна [1]. Розв'язок інтегрального рівняння знайдено із застосуванням інтегрального перетворення Мелліна [7]. Отримано вирази для напружень у кожній точці чвертьплощини та показано, що вони збігаються з відомими [4].

2. У півсмугі  $0 \leq x < \infty$ ,  $-h \leq y \leq h$  розв'язується бігармонічне рівняння із заданою на межі півсмуги шуканою функцією та її нормальною похідною, причому останні набувають нульових значень на променях  $0 \leq x < \infty$ ,  $y = \pm h$ . Розв'язок подається у вигляді розв'язку бігармонічної задачі для смуги  $-\infty < x < \infty$ ,  $-h \leq y \leq h$  через інтеграли Фур'є з продовженням крайових умов на промені  $-\infty < x < 0$ ,  $y = \pm h$ . Невідомі функції на цих променях після задоволення крайових умов на торці півсмуги  $-h \leq y \leq h$ ,  $x = 0$  визначаються із системи інтегральних рівнянь, яка перетворюється до комплексного функціонального рівняння відносно певних функціоналів шуканих функцій. До такого самого функціонального рівняння зводиться бігармонічна задача для півсмуги за методом однорідних розв'язків [6]. Отже, в цій задачі метод продовження розкриває зміст невідомих коефіцієнтів у методі однорідних розв'язків і слугує додатковим обґрунтуванням можливості подання розв'язку задачі для півсмуги у вигляді розвинення за системою власних функцій для смуги. Функціональне рівняння розв'язано зведенням до нескінченної системи алгебричних рівнянь методом Бубнова – Гальоркіна. Отриманий методом редукції розв'язок системи алгебричних рівнянь порівнюється з розв'язком розглядуваної задачі, знайденим методом Папковича [2, 5]. Значення шуканої функції, обчислені різними методами, збігаються до четвертого знаку.

3. Розглянуто бігармонічну задачу для півсмуги з криволінійним краєм:  $\varphi(y) \leq x < \infty$ ,  $-h \leq y \leq h$ . Із застосуванням методу продовження показано, що подання розв'язку цієї задачі у вигляді розвинення за власними функціями можливо тільки за виконання умов  $\varphi(h) = \varphi(-h)$ ,  $\varphi(y) > \varphi(\pm h)$ , тобто коли криволінійний край міститься всередині півсмуги з прямолінійним торцем. Аналогічно попередньому задача зводиться до нескінченної системи алгебричних рівнянь.

4. Розглянуто бігармонічну задачу для прямокутника  $-a \leq x \leq a$ ,  $-h \leq y \leq h$ . Отримано подання розв'язку у такій самій формі, як і за методом однорідних розв'язків. Методом



Бубнова – Гальоркіна функціональне рівняння задачі зведено до нескінченної системи алгебричних рівнянь.

#### Список використаних джерел

1. Гахов Ф. Д., Черский Ю. И. Уравнения типа свертки. М.: Наука, 1978. 286 с.
2. Мелешко В. В., Токовий Ю. В. Про алгоритм П. Ф. Папковича у методі однорідних розв'язків для двовимірної бігармонічної задачі у прямокутній області. *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* 2006. 49, № 4. С. 69–83.
3. Мухелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 707 с.
4. Острик В. І. Симетрія інверсії розв'язків основних крайових задач двовимірної теорії пружності для клина. *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* 2017. 60, № 4. С. 90–110.
5. Папкович П. Ф. Об одной форме решения плоской задачи теории упругости для прямоугольной полосы. *Докл. АН СССР.* 1940. 27. С. 335–339.
6. Прокопов В. К. Обзор работ по однородным решениям теории упругости и их приложениям. *Тр. Ленингр. политехн. ин-та.* 1967. № 279. С. 31–46.
7. Уфлянд Я. С. Интегральные преобразования в задачах теории упругости. Л.: Наука, 1968. 402 с.

**Подгорнова Д. Я.**

курсантка,

**Сусь Б. А.**

доктор педагогічних наук,

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут,

м. Київ, Україна

*bogdansus@gmail.com*

### РУХ ЧАСТИНКИ З ВЕЛИКОЮ ШВИДКІСТЮ І ХВИЛЬОВИЙ ПРОЦЕС

Частинки, які рухаються з великою швидкістю є так званими хвилями де Бройля дійсно являють собою хвильовий процес. Але властивість бути частинкою і хвилею водночас знаходиться в суперечності. Бо хвиля – це коливання, які поширюються в просторі. А що коливається, коли частинка рухається зі **сталою швидкістю** ? Сто років тому не могли знайти пояснення, як так може бути, в чому ж суть двоїстості. Справа в тому, що в природі існують не просто хвилі, а є дві зовсім різні природи хвиль – хвилі як коливання середовища і хвилі як потік частинок, що рухаються поступально і ще коливаються. Частинка просто так з великою швидкістю не рухається – її для цього треба прискорити, а значить надати їй кінетичної енергії. Відомо, що матерія перебуває у двох видах – речовини і поля. Ознакою речовини є маса ( $m$ ), а характеристикою поля – енергія ( $W$ ). Між цими складовими матерії існує відомий зв'язок:  $W = c^2 m$ . А це значить, що коли змінюється, наприклад маса, то відповідно повинна змінюватись енергія:  $\Delta W = c^2 \Delta m$ . Підтвердженням може бути зростання маси електронів, які прискорюються в циклотронах до великих швидкостей. Це змінна маса, «динамічна». При прискоренні зростає енергія частинки, а значить повинна зростати маса. Це маса змінна, динамічна. Тому коли прискорення закінчиться, ця маса почне зменшуватися, переходячи в енергію, оскільки є закон збереження маси і закон збереження енергії. Це так, ніби відхилили і відпустили маятник. В результаті виникають коливання типу:

$$\Delta m \rightarrow \Delta W \rightarrow \Delta m \rightarrow \Delta W \rightarrow \dots$$

Квантова механіка підтверджує як хвильові, так і корпускулярні властивості хвильчастинок. Співвідношення невизначеності Гейзенберга визначає такі властивості мікрочастинки мати невизначеність маси. Частинка масою  $m$ , яка рухається рівномірно з великою швидкістю  $v$ , має кількість руху:  $p = mv$ . В класичній механіці, коли маса відносно велика, а швидкість руху мала, можна вказати місце знаходження такого тіла в будь-який момент часу. Однак у квантовій механіці таке зробити неможливо через те, що маса частинки змінюється. І особливість частинки в тому, що вона, рухаючись рівномірно зі швидкістю  $v$ , ще перебуває в коливальному стані. В результаті виникає хвильовий процес з певною довжиною хвилі де Бройля  $\lambda_D$  (рис. 1). Аналогічно до маси коливається кількість руху частинки:  $p = mv$  (рис. 2).

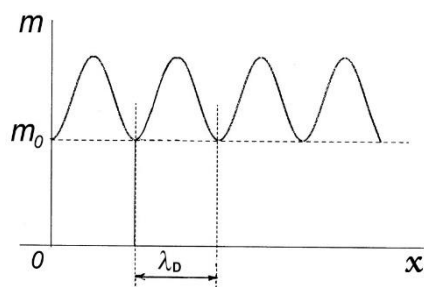


Рис. 1. Хвильовий процес з певною довжиною хвилі де Бройля  $\lambda_D$

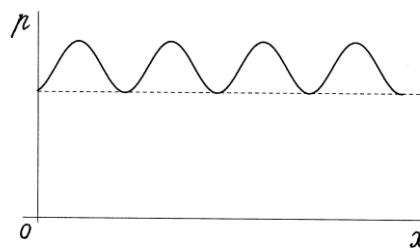


Рис.2. Коливання кількості руху прискореної частинки

Про положення частинки в просторі ми судимо по тому, де знаходиться її маса. Оскільки маса при русі частинки коливається, то в різних місцях вона різна і існує проблема місцезнаходження частинки. Тобто, існує **певна невизначеність** знаходження маси  $\Delta m$ . Відповідно існує також невизначеність кількості руху частинки:  $\Delta p = \Delta m v$ . Тому логічно невизначеність положення частинки  $\Delta x$  розглядати в межах довжини хвилі де Бройля  $\lambda_D$  :

$$\Delta x = \lambda_D. \quad (1)$$

Подібно і з кількістю руху, яка при русі частинки змінюється. Найбільша невизначеність кількості руху при зміні координати в межах  $\lambda_D$  може бути рівною самій величині кількості руху:

$$\Delta p_x = p. \quad (2)$$

Перемноживши ліві і праві сторони (1) і (2), одержимо:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x = \lambda_D p. \quad (3).$$

Враховуючи, що для хвилі де Бройля

$$\lambda_D = \frac{h}{p}, \quad (3) \text{ запишемо:} \quad \Delta x \Delta p_x = \lambda_D p = \frac{h}{p} \cdot p,$$

$$\text{або} \quad \boxed{\Delta x \cdot \Delta p_x = h}. \quad (4)$$

Це і є **співвідношення невизначеності Гейзенберга**, яке означає, що чим точніше будемо знати положення частинки ( $\Delta x \rightarrow 0$ ), тим більшою буде невизначеність кількості руху  $\Delta p_x$ , оскільки добуток  $\Delta x \Delta p_x$  не змінюється. І навпаки, якщо б точно знати величину кількості руху ( $p_x \rightarrow 0$ ), то не можемо знати, де саме знаходиться частинка. Таким чином, співвідношення невизначеності є своєрідним вираженням корпускулярного підходу у квантовій механіці.

#### Список використаних джерел

1. Физический энциклопед. словарь. Гл. ред. А.М. Прохоров и др. М.: «Советская энциклопедия». 1983.

**Положій Г. Є.**  
аспірант, спеціальність «01.04.20 – фізика пучків заряджених частинок»,  
**Ребров В. А.**  
старший науковий співробітник,  
**Колінько С. В.**  
науковий співробітник,  
**Саливон В. Ф.**  
провідний інженер,  
**Пономарьов О. Г.**  
доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу,  
**Калінкевич О. М.**  
старший науковий співробітник,  
**Калінкевич О. В.**  
молодший науковий співробітник,  
**Зінченко Є. І.**  
молодший науковий співробітник,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
*polojiy\_ge@ipflab.sumy.ua*

## **ВДОСКОНАЛЕННЯ КАНАЛУ ПРОТОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ЛІТОГРАФІЇ НА АПК “СОКОЛ” В ІНСТИТУТІ ПРИКЛАДНОЇ ФІЗИКИ НАН УКРАЇНИ**

Протонно-променева літографія (Proton-beam writing) є способом створення малорозмірних структур. На відміну від загальноприйнятої в електронній промисловості ультрафіолетової літографії, цей метод не потребує попередньо виготовлених масок. Натомість, шаблон структури задається на комп’ютері, який керує скануючою системою каналу протонної літографії. Цей шаблон може мати будь-яку задану форму.

В ІПФ НАНУ (м. Суми) протягом минулого року була успішно здійснена апробація виготовлення мікроструктур з ПММА за заданим з комп’ютера шаблоном. Також було здійснене суттєве вдосконалення програмного забезпечення для керування каналом протонної літографії. Зокрема, розроблена програма для графічного керування системою механічного переміщення та методика визначення розміру та асиметрії протонного пучка в процесі експерименту. Дані вдосконалення відкривають шлях до виробництва малорозмірних структур певної геометрії, а також великих (кілька сантиметрів) структур з малорозмірними елементами.

Також, крім літографії по ПММА, вперше в світі проводились експерименти з протонною літографією по хітозану — біополімерному матеріалу. За минулий рік вдалось провести пілотні експерименти з літографією по хітозану. Були отримані лінійні мікроструктури на плівці хітозану на твердій підкладці [1], а також мікроструктури складної форми на плівках хітозану без підкладки.

Плануються експерименти з протонною літографією по п’єзоелектричному матеріалу ПВДФ (полівініліденфторид). П’єзоелектричні малорозмірні структури можуть бути застосовані, зокрема, в мікроробототехніці, мікрорідинних структурах та фотонних процесорах.

### **Список використаних джерел**

1. Proton Beam Writing on Chitosan Films for Bionanomedicine and Microfluidics: Pilot Experiments <https://ieeexplore.ieee.org/document/9309570/>

**Пономарьов О. Г.**

доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу,

**Садовий С. О.**

молодший науковий співробітник,

**Возний В. І.**

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,

Інститут прикладної фізики НАН України,

м. Суми, Україна

*vozny56@gmail.com*

## **МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИКИ ПУЧКА В ІОННОМ ІНЖЕКТОРІ ДЛЯ КОМПАКТНОГО ЯДЕРНОГО МІКРОЗОНДУ**

Традиційна схема ядерного мікрозонда заснована на широко використовуваних електростатичних прискорювачах з іонними джерелами, які мають низьку яскравість в порівнянні з електронними гарматами. Використання джерел високої яскравості стикається з проблемами в оптиці прискорювальної трубки. Великі розміри мікрозондових установок не є комерційно привабливими. Це стимулює пошук способів створення мікрозондових систем меншого розміру, які були б простіше в експлуатації і значно дешевше, з одного боку, і містили фізичні принципи для поліпшення роздільної здатності, з іншого. Раніше були проведені дослідження оптики компактного ядерного мікрозонда на базі спеціалізованого прискорювача. Тут в якості об'єкта, як і в електронному скануючому мікроскопі, використовується кросовер пучка, утворений іонним інжектором, а прискорювальна трубка включена в процес формування зонда. Така імерсійна зондоформуюча система містить мінімум дрейфових проміжків, що значно зменшує її розмір і покращує умови юстування оптичних елементів.

У даній роботі представлені результати чисельного моделювання оптики іонного інжектора, метою якого є створення кросовера пучка з мікрометричними розмірами. Такий кросовер використовується в подальшому як об'єкт в імерсійній зондоформуючій системі. В інжекторі застосовується іонне джерело Пеннінга з імерсійним отвором 20 мкм, що забезпечить струм пучка на рівні кількох нА. До складу інжектора так само входять фільтр Вина, призначений для вибору певного сорту іонів, і одиночна електростатична лінза. В результаті моделювання показано, що кросовер має розміри кількох мікрометрів.

**Ребров В. А.**  
старший науковий співробітник,  
**Колінько С. В.**  
науковий співробітник,  
**Саливон В. Ф.**  
провідний інженер,  
**Пономарьов О. Г.**  
доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
*62rebroff@gmail.com*

## КАНАЛ ПРОТОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ЛІТОГРАФІЇ

Протонно-променева літографія (ППЛ) на сьогоднішній день є добре розвинутою літографічною технологією, що забезпечує високу роздільну здатність. За допомогою ППЛ можна створювати 3-вимірні мікро- і нано-розмірні структури з великим аспектним співвідношенням, строго вертикальними бічними стінками з шорсткістю на рівні 3 нм. У даній роботі розглянуті особливості конструкції та основних елементів нового каналу протонно-променевої літографії, який створений на базі діючого каналу ядерного мікрозонда в складі аналітичного прискорювального комплексу ПФ НАН України.

Приділено увагу фізичним параметрам нового інтегрованого дублета магнітних квадрупольних лінз, електростатичної скануючої системи, поєднаного триплету магнітних квадрупольних лінз, камери взаємодії сфокусованого пучка зі зразками.

Ярмо інтегрованого дублета магнітних квадрупольних лінз виготовлено з цільної заготовки електротехнічної сталі методом електроерозійної обробки. Технологія виготовлення ярма забезпечує збіг геометричних осей в лінзах дублета з точністю до декількох мікрон. Геометрія ярма розрахована шляхом чисельного моделювання з метою отримання максимальної магнітної індукції на полюсі при заданому радіусі апертури лінз. Полюса мають форму усічених гіпербол, що в поєднанні з високою точністю їх позиціонування, забезпечує низький рівень паразитних секступольних і октупольних компонент поля. Струмові котушки виготовлені з мідних пластин. Дублет розташований на юстувальному столі з п'ятьма ступенями свободи. Експериментальне дослідження дублета було проведено із застосуванням стенда визначення структури поля в магнітних квадрупольних лінзах. Були визначені взаємне розташування фізичних осей лінз (геометричне місце точок з нульовою магнітною індукцією) і величини паразитних мультипольних компонент поля.

Електростатична скануюча система складається з трьох пар паралельних пластин, що забезпечують відхилення пучка у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Причому в напрямку  $xOz$  відхилення здійснюється за типом dog-leg, коли кожна з двох пар пластин відхиляє пучок в протилежні сторони.

Поєднаній триплет магнітних квадрупольних лінз складається з трьох лінз, поміщених в жорсткий корпус. Юстування всіх лінз з метою суміщення їх локальних систем координат проводилося на спеціалізованому стенді, що дозволило забезпечити збіг осей з точністю  $<1$  мрад. У каналі ППЛ триплет розташований на юстувальному столі з п'ятьма ступенями свободи, що забезпечує суміщення власної оптичної осі триплету з віссю пучка.

Камера взаємодії сфокусованого пучка зі зразками виготовлена у формі паралелепіпеда зі знімними фланцями на гранях. До нижнього фланцю приєднано турбомолекулярний насос. На бічних фланцях розміщені оптичний мікроскоп з CCD камерою для спостереження за пучком на кварцовому екрані, механізм позиціонування зразків і детектор вторинних електронів.

**Сайко М. О.**  
молодший науковий співробітник,  
**Рідченко С. О.**  
молодший науковий співробітник,  
**Ігнатенко С. М.**  
молодший науковий співробітник,  
**Марійчук О. В.**  
головний інженер проекту,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
*niksayko@gmail.com*

## **ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ РЕАЛІЗАЦІЇ УНІВЕРСАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ НАУКОВО-МІСТКИХ ПРОЦЕСІВ НА ПРИКЛАДІ ВАКУУМНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РОЗПИЛЕННЯ**

Автоматизація наукових процесів (наукового обладнання) (АНП) істотно відрізняється від автоматизації технологічних процесів (промислового обладнання) в плані здатності до адаптації. В той же час існуючий парк вартісних науково-містких установок потребує оновлення електронного та інформаційного вмісту відповідно до вимог сучасних інформаційних технологій. Для вирішення задачі щодо автоматизації науково-містких процесів необхідно:

- розробити принципи системи автоматизації наукових установок на базі новітніх апаратних та програмних технологій, яка мала б рису універсальності, тобто здатності до адаптації до різних існуючих та перспективних наукових установок та поточної зміни параметрів в широкому спектрі;

- дослідити перспективність застосування та переваги/недоліки Ethernet, стеку TCP/IP, специфікації Manufacturing Message Specification (MMS), хмарних технологій в АНП;

- розробити систему АНП для установок вакуумного наплення –ВУП-5, ВУП-5М;

- дослідити можливість та спосіб синхронізації об'єктів автоматизації в мережі Ethernet.

На прикладному рівні система базується на чотирьох основних принципах — *модульність, гнучкість, програмованість, зв'язаність.*

При цьому можна сформулювати основні принципи мікропроцесорних систем автоматизації:

- відкритість по архітектурі, тобто можливість нарощування функцій в процесі експлуатації;

- постійне вдосконалення функцій системи, в першу чергу за рахунок її інтелектуалізації;

- декомпозиція системи за функціями на окремі підсистеми, які можуть взаємодіяти між собою з значною самостійністю;

- динамічна координація підсистем в оперативних умовах роботи;

- децентралізація управління з дублюванням функцій;

- інтерактивна взаємодія, коли користувачеві створюються найбільш сприятливі умови для спілкування з системою на основі дружнього інтерфейсу

В конкретному випадку для магнетронного наплення автоматизована система забезпечує наступні функції:

- управління системою відкачки;

- регулювання тиску робочого газу в камері та його натікання;

- вимірювання товщини плівки;

- регулювання напруги живлення магнетронів;
- вимірювання іонного струму магнетронів;
- регулювання температури підкладки.

#### Список використаних джерел

1. Mariagrazia Dotoli, Alexander Fay, Marek Miśkowiec, Carla Seatzu. An overview of current technologies and emerging trends in factory automation. *International Journal of Production Research*. 2018. URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1510558>
2. Dr. Ross D King. Automating Science using Robot Scientists. *E4R Symposium*. 2020. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=LQaKoM5YGXk>
3. Коляда, А. С. Волобоев В. О., Гогунський В. Д. Сучасні тенденції розвитку систем автоматизації технологічних процесів за наукометричними даними Scopus / А. С. Коляда, // Шляхи реалізації кредитно-модул. системи орг. навч. процесу і тестових форм контролю знань студентів : зб. матеріалів наук.-метод. семінару. - Одеса, 2015. – Вип. 10. - С. 46-52.

**Салтиков Д. І.**

викладач,

**Яременко Я. В.**

магістрантка, спеціальність «014 Середня освіта (Фізика)»,

Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка,

**Міщенко Д. К.**

учитель математики та фізики

загальноосвітня школа Дзон Гуан Цун,

м. Пекін, КНР

*yanayaremenko846@gmail.com*

#### ДЕЯКІ ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ СУЧАСНОЇ ФІЗИКИ В ШКІЛЬНОМУ КУРСІ

Науково-технічний прогрес та розвиток фізичної науки призводить до постійного зростання наукових знань, які мають бути засвоєні учнями.

Нові цілі навчання зумовлюють включення до навчальних програм з фізики все нових і нових питань. Зокрема, розвиток фізики призвів до того, що у навчальну програму курсу фізики свого часу були введені елементи спеціальної теорії відносності, питання фізики напівпровідників, квантової фізики та фізики твердого тіла. На сьогоднішній час набуло актуальності питання про включення та вивчення у шкільному курсі фізики основ нанотехнологій. Іншими словами, спостерігається тенденція до зменшення розриву між часом відкриття нових знань і часом їх вивчення. Разом з тим, для учнів фізичні знання часто так і залишаються сукупністю певних «догм», які їм необхідно запам'ятати. Матеріал з фізики учням нерідко здається «відірваним від реального життя», що негативно позначається на їх мотивації до навчання та досягнутих результатах. Пов'язане це, передусім, з тим, що у шкільному курсі фізики недостатню увагу приділено саме прикладним аспектам – практичному застосуванню сучасних наукових досягнень. Одним із шляхів мотивування учнів до пізнавальної діяльності може бути ознайомлення учнів з прикладними аспектами сучасної фізики під час уроків та самостійно, у процесі роботи над навчальними проектами [1]. Саме використання проектної технології у процесі навчання фізики створює умови для розвитку особистості учнів, їх творчого потенціалу та самостійності у вирішенні нетипових завдань [2]. Зауважимо, що учитель сам повинен весь час підвищувати свій науково-методичний рівень щодо сучасних досягнень фізики та нанотехнологій [3].

Одна з найважливіших тем, що вивчаються у шкільному курсі фізики (11-й клас), пов'язана з лазерами. Квантові генератори світла були створені на початку шістдесятих

років минулого століття. Квантова фізика стала більш високою сходинкою пізнання, аніж класична. Вона встановила обмеженість багатьох класичних уявлень. Важливо зауважити, що вивчення основ квантової фізики у загальноосвітній школі є доволі складною методичною задачею. Мала наочність квантово-механічних об'єктів («частинка-хвиля»), складність математичного апарату, незвичайність її вихідних ідей і понять створюють методичні труднощі. Тому питання квантової фізики дуже обережно вводять у шкільний курс. Однак, унікальні властивості лазерів зумовили широке застосування цих приладів в науці, промисловості й побуті. На цьому й необхідно сконцентрувати увагу учнів під час вивчення теми. Учням варто повідомити, що сьогодні без використання лазерів неможливо уявити жодної сучасної галузі. Лазерні технології лежать в основі виробництва сучасних комп'ютерів, пристроїв для читання і запису CD та DVD дисків, лазерних принтерів, мишок, указок, і багатьох інших пристроїв, якими учні постійно користуються. Слід зауважити, що кожного року автори найвагоміших відкриттів у фізиці нагороджуються Нобелівською премією. Таких премій за історію від відкриття лазерів до сьогодні було декілька. Перша премія була вручена у 1964 році Ч. Таунсу, М. Басову і О. Прохорову за відкриття, а останню в 2018 році присудили А. Ашкіну, Ж. Мору та Д. Стрікленд за досягнення у сфері лазерної фізики. А. Ашкін винайшов "лазерний пінцет", здатний утримувати світловими променями атоми та молекули. Це дало можливість досліджувати віруси, бактерії та інші живі клітини, не пошкоджуючи їх. Завдяки цьому стали можливі, зокрема, найважчі операції на очах. Ж. Мору та Д. Стрікленд винайшли метод отримання ультракоротких та високоєфективних лазерних імпульсів. Техніка, на їх основі, відкрила нові можливості для використання лазерів у промисловості та медицині.

В 30-х роках минулого століття з'явилося розуміння, що існують такі кристалічні об'єкти, які називаються напівпровідниками. Це привело до того, що радіоелектроніка перейшла від габаритних лампових пристроїв на пристрої, які мають набагато менший розмір, тобто напівпровідникові пристрої. Сучасна техніка неможлива без напівпровідникових приладів. У шкільному курсі фізики теорія напівпровідників вивчається у 11-му класі. Вивчення властивостей напівпровідників і механізмів протікання в них електричного струму дає можливість ознайомити учнів з будовою напівпровідників, показати сфери їх застосування. Треба акцентувати увагу учнів, що одним з найвагоміших відкриттів фізики ХХ століття стало створення транзистора. Воно було зроблено у 1947 році трьома видатними американськими фізиками – Дж. Бардінім, У. Браттейном і В.Шоклі в лабораторії компанії «Белл телефон» і стало наслідком бурхливого розвитку фізики напівпровідників і напівпровідникової технології, взагалі. У 1954 вчені отримали за своє відкриття Нобелівську премію. Особливу увагу під час розгляду вказаної теми варто приділити питанням практичного застосування напівпровідників. В елементах комп'ютерів використовуються напівпровідникові інтегральні схеми, які по суті є багатофункціональними напівпровідниковими приладами. Інтегральні схеми містять велику кількість напівпровідникових елементів, що взаємодіють між собою: діодів, тріодів різних типів, резисторів, конденсаторів, ключових приладів. Ці елементи скомпоновані в одній матриці, в якості якої використовується окремий кристал або декілька кристалів, розміщених в одному корпусі з безліччю контактних виводів. За більш як сімдесят років свого розвитку фізика напівпровідників та пов'язана із нею промисловість пройшли великий шлях від перших діодів до мікросхем. У мікросхемі зразка 1965-го року було 30 транзисторів, тоді як сьогодні чіп Radeon NV 3870 містить 660 мільйонів транзисторів. На сьогоднішній день створені великі інтегральні схеми, густина активних елементів у яких досягає  $10^4$  на  $\text{мм}^2$ . Застосування інтегральних схем дозволяє суттєво зменшити розміри обчислювальних пристроїв, підвищити їх надійність та економічність. У 2000 році Нобелівську премію з фізики отримали Ж.Алфьоров, Г.Кремер, Дж. Кілбі за розробки в фізиці напівпровідників та дослідження в галузі інтегральних схем. Це служить ще одним підтвердженням важливості таких розробок для розвитку нашого суспільства.

З розвитком технологій людство все більше і більше прагне до автоматизації і оптимізації всього навколо себе. Багато в чому оптимізація зачіпає форму, матеріал і



розміри оптимізованих об'єктів. Комп'ютери стають все компактніше, екрани все тонше, а деякі пристрої навіть неможливо розгледіти неозброєним оком. Ще одним актуальним напрямом розвитку науки є нанотехнології. Зазвичай їх розглядають як міждисциплінарну науку, але основний внесок у їх розвиток вносить саме фізика. Завдання нанотехнологій полягає в:

- отриманні наноматеріалів із заданою структурою і властивостями;
- застосуванні наноматеріалів за певним призначенням із урахуванням їх структури і властивостей;
- контролю структури і властивостей наноматеріалів як у ході їх отримання, так і в період їх застосування.

Отже, на вчителя фізики покладається важлива роль – формування наукового світогляду учнів шляхом ознайомлення їх з досягненнями в галузі нанотехнологій та їх впливом на життя людства [4]. Ознайомлення учнів з наноматеріалами передбачене навчальними програмами у межах вивчення молекулярної фізики в 10-му класі. Тут учням варто пояснити, що різниця між властивостями малих частинок речовини та масивного тіла відома вченим давно і використовується в різних галузях науки та техніки. Використання цих властивостей на практиці в сучасних умовах і складає суть нанотехнологій. На її основі вже реалізовані зразки наноструктурних надтвердих, надлегких, корозійностійких і зносостійких матеріалів і покриттів, каталізаторів з високорозвиненою поверхнею, нанопористих мембран для систем тонкого очищення рідин, надшвидкісних приладів наноелектроніки тощо. За унікальні дослідження в цій галузі було присуджено 6 Нобелівських премій з фізики та хімії. Особливо цікавими, на наш погляд, є результати досліджень, за які була присуджена Нобелівська премія з фізики в 2007 році. Лауреатами її стали А. Ферт та П. Грюнберг, які в 1988 році незалежно один від одного відкрили ефект гігантського магнітоопору (ГМО). Відкриття ГМО послужило основою для розвитку спінтроніки [5]. Так, з 1997 року компанія ІВМ в промислових масштабах почала виготовляти спінтронні прилади - голівки для зчитування магнітної інформації на основі ГМО, розмірами 10-100 нм. Крім цього, ефект ГМО знайшов практичне застосування при розробці комп'ютерних жорстких дисків, що дозволило в останні роки значно зменшити їх розміри і збільшити ємність.

На узагальнюючих уроках фізики в 11 класі слід приділити увагу розвитку енергетики. Учні повинні розуміти, що споживання енергій з кожним роком зростає, тому проблеми енергоефективності у світі та в Україні є надзвичайно важливими. Через вичерпність, високу ціну енергоресурсів, складну ситуацію навколишнього середовища є необхідність у використанні відновлювальних джерел енергії, що спонукає до пошуку нових напрямків їх виробництва. Енергетика сьогодні – це основа нашого життя. Вона включає атомну, теплову, гідроенергетику, геліоенергетику тощо. Вклад кожної складової у різних країнах різний і залежить від її енергетичної політики. Так, наприклад, у Німеччині частка альтернативної енергетики, яка включає енергію сонячного випромінювання, вітру, морів, річок, біомаси, теплоти землі складає близько 25 %. Хоча ще 10 років тому країна була серед лідерів використання атомної енергетики. Позиція країни різко змінилася після техногенної катастрофи на атомній електростанції у Японії у 2011 році. Країна планує відмовитися від використання атомної енергії до 2022 року. У той же час Франція, навпаки, веде активні дослідження у цій галузі. У країні працюють 58 реакторів, які забезпечують близько 72% потреб електроенергії. Що стане основою енергетики майбутнього? На це питання немає однозначної відповіді. Дискусія з цього питання зацікавить учнів, та спонукає до самостійного пошуку інформації.

Отже, одним із шляхів не лише актуалізації шкільного курсу фізики, а й мотивування учнів до навчання, демонстрування зв'язку теоретичних знань з їх практичним застосуванням є розгляд прикладних аспектів сучасної фізики під час вивчення окремих тем та розділів.

### Список використаних джерел

1. Салтикова А.І. Лохоня М.М. Навчальні проекти з фізики у сучасній школі. *Теоретико-методичні засади вивчення сучасної фізики та нанотехнологій у загальноосвітніх та вищих навчальних закладах*: матеріали IV Всеукраїнської науково-методичної конференції, 27 листопада 2019 р. Суми: СумДПУ, 2019. С. 74 – 76.
2. Салтикова А.І., Абакарова Г.О. Проектні технології навчання фізики в школі. *Сучасні проблеми експериментальної, теоретичної фізики та методики навчання фізики*: матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених, 12-13 квітня 2017 р. Суми: СумДПУ, 2017. С. 56 – 61.
3. Завражна О.М., Одноворець Л.П., Пасько О.О., Салтикова А.І. Методика формування у студентів знань про стан сучасної фізики та нанотехнологій. *Педагогічні науки: теорія, історія, інноваційні технології*. 2018. №1(75). С. 196 – 208.
4. Zavrzhna O.M., Odnodvoret L.V., Pasko O.O., Saltykova A.I. Methodological Bases for Study Nanotechnology in the General Physics Course of Higher Educational Institutions. *J. Nano-Electron. Phys.* 2017. Vol. 9, № 5. P. 05032.
5. Лобода В.Б., Шкурдода Ю.О., Довжик М.Я., Кравченко В.О., Хурсенко С.М. Ефекти гігантського і анізотропного магнітоопору: демонстрація і вивчення в курсі фізики закладів вищої освіти. *Ж. нано-електрон. фіз.* 2018. Том 10, № 3. С. 03016-1 – 03016-8.

**Салтикова А. І.**

кандидат фізико-математичних наук, доцент,

**Лобас О. М.**

викладач,

**Чепурко І. О.**

магістрант, спеціальність «014 Середня освіта (Фізика)»,

Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка

*chepurkoivan236@gmail.com*

### ПИТАННЯ РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ У ШКІЛЬНОМУ КУРСІ ФІЗИКИ

Метою навчання фізики в основній школі є розвиток учнів як особистостей, становлення їх наукового світогляду та критичного стилю мислення, формування як предметної й науково-природничої, взагалі, так і ключових компетентностей.

У всіх навчальних програмах предметів, які вивчаються, виокремлено наскрізні змістові лінії, які орієнтовані на розкриття провідних соціально й особистісно значущих ідей, що забезпечує формування ціннісної і світоглядної направленості учнів та визначають їх поведінку в певних життєвих ситуаціях. Одною з таких змістових ліній є екологічна безпека та сталий розвиток. Вона формує в учнів соціальну активність, відповідальність та екологічну свідомість, готовність брати участь у заходах щодо збереження довкілля та спонукає до праці на розвиток суспільства, переконання у важливості сталого розвитку для нащадків. Реалізація цієї наскрізної змістової лінії щодо радіаційної безпеки під час навчання фізики у 9 класі полягає у відповідному трактуванні навчального змісту тем пов'язаних з іонізаційною дією радіоактивного випромінювання; природним радіоактивним фоном; методами його визначення з допомогою дозиметрів; біологічною дією радіоактивного випромінювання; ядерною енергетикою розділу «Фізика атома та атомного ядра. Фізичні основи енергетики» та тем розділу «Фізика і екологія». Отримані на уроках знання щодо суті фізичних явищ учні можуть використати для вирішення проблем довкілля; визначення причинно-наслідкових зв'язків впливу сучасного виробництва та життєдіяльності людини на природне середовище. Завдяки розумінню іонізуючої дії радіоактивного випромінювання на людину та довкілля, правильному

сприйняттю переваг та недоліків атомної енергетики учні зможуть критично оцінювати результати людської діяльності в довкіллі, усвідомлювати важливість ощадного використання природних ресурсів; ефективно співпрацювати з іншими під час виконання проектів екологічного змісту, розв'язувати проблеми довкілля, залучаючи рідних та знайомих до заходів з охорони природи, проводити роз'яснювальну роботу серед населення. Ефективним засобом навчання є використання учителем [1] інформації спеціальних міжнародних організацій, що займаються проблемами радіації та атомної енергетики, таких як Міжнародна комісія з радіаційного захисту (МКРЗ), а також створених рішеннями ООН Наукового Комітету з дії атомної радіації (НКДАР) та Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ). Це стосується, наприклад, питань розвитку атомної енергетики та інформації щодо техногенних катастроф, пов'язаних з радіацією. 26 квітня 2021 року виповнюється 35 років з дня Чорнобильської катастрофи. Учням слід нагадати про ці події на уроці, запропонувати самостійно зібрати інформацію, переглянути фільми, а потім обговорити на позакласному заході. Як варіант назви «Чорнобиль вчора, сьогодні, завтра». Такий підхід викликає цікавість в учнів і спонукає їх до самостійного пошуку відповідей на питання, які виникли під час обговорення. Іншим дієвим засобом підвищення ефективності засвоєння матеріалу є робота над навчальними проектами на теми, які мають дискусійний характер [2]. Наприклад, пов'язані з перевагами та недоліками атомної енергетики в світі та в Україні, необхідності використання ядерної енергії, проблемами Чорнобиля тощо.

Слід зауважити, що формування уявлень про радіаційну безпеку доцільно вести на основі здійснення міжпредметних зв'язків. Знання з радіаційної безпеки, отримані учнями на уроках фізики можуть бути використані ними при вивченні інших предметів природничо-наукового циклу (хімії, біології, астрономії, а також предмета "Основи безпеки життєдіяльності") і для продовження навчання фізики в старшій школі.

#### Список використаних джерел

1. Завражна О.М., Салтикова А.І. Екологічний аспект професійної компетентності майбутніх учителів фізики. *Літні наукові зібрання: матеріали X Міжнародної науково-практичної інтернет конференції*, 19 червня 2017 року. м. Вінниця : інтернет видання *el-conf.com.ua*. 2017. С. 56 – 61.
2. Салтикова А.І. Лохоня М.М. Навчальні проекти з фізики у сучасній школі. *Теоретико-методичні засади вивчення сучасної фізики та нанотехнологій у загальноосвітніх та вищих навчальних закладах: матеріали IV Всеукраїнської науково-методичної конференції*, 27 листопада 2019 р. Суми: СумДПУ, 2019. С.74 – 76.

**Сергієнко Л. Г.**

кандидат педагогічних наук, доцент,  
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»,  
м. Покровськ, Україна  
*liudmyla.serhienko@donntu.edu.ua*

#### ДИДАКТИЧНІ КРИТЕРІЇ УПРАВЛІННЯ УСПІШНІСТЮ СТУДЕНТІВ

Важливою складовою частиною всього комплексу методики та організації самостійної роботи студентів є її контроль. Головна мета контролю у вищих навчальних закладах – допомогти тим, хто навчається (студентам) зробити їхні самостійні заняття більш ефективними.

В середній школі засвоєння навчальної програми перевіряється від уроку до уроку, тобто, майже постійно. Результати перевірки нотуються у журнал, а наприкінці чверті виставляється загальна диференційована оцінка. Така система контролю і є поточною

успішністю. У більшості вищих навчальних закладів справа до знедавна відбувалася інакше. Існувала практика критерію успішності студентів у вигляді залікової-екзаменаційної сесії наприкінці кожного семестру.

Звертаємо увагу на дві обставини, перша – загальним критерієм успішності студента є і екзамени, і заліки, а не тільки екзамени, як це нерідко зустрічається на практиці. Друга – заліки підводять підсумки, головним чином, придбанням вмінь та навичок, а іспити – у більшості випадків, знанню теоретичної частини дисциплін, які вивчаються. Вміння та навички формуються в процесі самостійного виконання обов'язкових завдань впродовж усього семестру, що автоматично потребує одночасного вивчення важливих теоретичних розділів курсу. Екзамени, як відомо, проводяться наприкінці семестру, тому вони характеризують не стільки успішність вивчення курсу, а лише підводять підсумки та зовсім не розглядають сам навчальний процес впродовж усього часу навчання. Адже, по своєму значенню поняття «успішності» пов'язано із часом («встиг – не встиг», «сформував – не сформував»)!

Таким чином, на наш погляд, успішність у вищому навчальному закладі характеризує своєчасність виконання обов'язкових завдань студентами впродовж певного періоду, який завершується екзаменом. Природно, що вимога якісного виконання завдань залишається при цьому в силі (вона, якраз, і гарантується заліком).

Про принципи отримання інформації стосовно самостійної роботи студентів писали відомі дидакти та методисти сучасності [1, с. 62, 2, с. 208-220].

Дана стаття присвячена особистому досвіду використання результатів контролю з метою більш якісного управління успішністю студентів. Відомо, що контроль роботи студентів несе інформаційну та керуючу функції. Він може бути розділений, також, на контроль особистої і контроль загальної успішності. Перший з них ставить собі за мету з'ясування рівня і якості знань, вмінь та навичок, отриманих даним студентом після певного етапу навчання, і керуюча функція такого контролю, яка виражається в коректуванні та вдосконаленні процесу навчання стосовно до даного студента. Загальний же інформаційний контроль, оцінюючи результати особистої успішності всіх студентів, характеризує навчальну діяльність групи, курсу, факультету, вищого навчального закладу. Тут керуюча функція контролю виражається в коректуванні та вдосконаленні навчального процесу взагалі (загальної методики викладання даної дисципліни, реалізації цієї методики, якості планування завдань, роботи викладача тощо).

На жаль, в практиці головні зусилля викладачів і деканатів часто витрачаються на отримання даних особистого контролю та на їх наступне покращання, перш за все, застосуванням адміністративних мір по відношенню до невстигаючих студентів. Інші можливості керуючого контролю використовуються значно слабкіше, а нам би хотілося, приймаючи як відправні положення достовірність даних про особисту успішність (тобто, не торкаючись методів їх отримання), розглянути досвід використання цих даних для роботи кожного студента та оптимізації навчального процесу взагалі.

Які ж завдання повинне вирішувати управління успішністю, спираючись на її контроль? Головним чином, нашою метою є задача поліпшення загальної професійної підготовки фахівців. Шляхів вирішення цієї задачі декілька: аналіз причин, які впливають на динаміку успішності студентів; вдосконалення методики викладання; чітка організація навчального процесу; оперативне усунення всіх причин, які порушують режим навчальних занять; активізація та індивідуалізація самостійної роботи студентів; уточнення раціонального об'єму обов'язкових занять і завдань; поліпшення навчальної літератури; організація ритмічної роботи студентів впродовж усього семестру; виховання у них почуття відповідальності за виконання навчального плану, заохочення успішно працюючих студентів; адміністративний вплив на тих студентів, які не виконують навчального плану.

Не випадково, що методи адміністративного впливу на студентів займають останнє місце в рейтингу критеріїв: на наш погляд, перекладання усієї відповідальності за успішність на плечі студента методичне не виправдано.

Отже, зрозуміло, яке велике значення для підготовки якісних фахівців має управління успішністю, якщо воно поставлене як оперативна система, яка спирається на більш широкий спектр показників, ніж звичайні диференційовані оцінки. Зрозуміло, можуть бути і інші думки, оскільки проблема управління успішністю все ще недостатньо вивчена. В практиці можна зустріти велику різноманітність шляхів її вирішення, особливо зараз в умовах майже повністю дистанційного навчання.

#### Список використаних джерел

1. Козаков В.А. Самостійна робота студентів як дидактична проблема. К.: НМК ВО, 1990. 62 с.
2. Методика навчання і наукових досліджень у вищій школі: навч. посіб. / [ред. С.У. Гончаренко, П.М. Олійник, В.К. Федорченко]. К.: Вища школа, 2003. С. 208-220

**Скороход Р. В.**

аспірант, спеціальність «104 Фізика та астрономія»,

**Коропов О. В.**

кандидат фізико-математичних наук,

доцент, старший науковий співробітник,

Інститут прикладної фізики НАН України,

м. Суми, Україна

*r.skorokhodqq@gmail.com*

### МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ДИСЛОКАЦІЙНОЇ ПІДСИСТЕМИ НА ЕФЕКТИ РАДІАЦІЙНО-ІНДУКОВАНОЇ СЕГРЕГАЦІЇ В ТРИКОМПОНЕНТНОМУ СПЛАВІ Fe-20%Cr-8%Ni

Явище *радіаційно-індукованої сегрегації* (РІС) полягає у просторовому перерозподілі компонентів металевого сплаву під дією опромінення при проміжних температурах ( $T=0,2 - 0,4 T_{пл.}$ ). Такий перерозподіл призводить до збіднення або збагачення зразка сплаву по головним, домішковим чи легуючим компонентам поблизу стоків точкових дефектів (ТД), таких як поверхні зразка, пори, дислокаційні петлі, міжзеренні межі та інші [1-4, 6, 7]. Зміни локального складу сплаву, зазвичай, негативно впливають на механічні та фізико-хімічні властивості матеріалу, а саме прискорюють утворення виділень нової фази, сприяють окрихченню матеріалу, тощо [4, 7].

В даній роботі проведено комп'ютерні розрахунки визначальних кількісних характеристик РІС [2] в сплаві Fe-20%Cr-8%Ni з урахуванням дислокаційної підсистеми матеріалу при різних значеннях густин дислокацій ( $\rho_D = 0$ ,  $\rho_D = 10^{12} \text{ м}^{-2}$ ,  $\rho_D = 10^{14} \text{ м}^{-2}$ ,  $\rho_D = 10^{16} \text{ м}^{-2}$ ). В роботі показано, що за однакових умов опромінення збільшення густини дислокацій призводить до зменшення концентрацій ТД та величин поверхневого збагачення або збіднення компонентів сплаву. Пояснення цього ефекту полягає в тому, що дислокаційна підсистема сплаву ефективно поглинає нерівноважні ТД (див. наприклад [5]), що призводить до зменшення потоків ТД і пов'язаних з ними потоків компонентів сплаву та в результаті призводить до послаблення ефектів РІС.

На рис. 1., в якості прикладу, наведено розраховані концентраційні профілі Cr (*a*) та Ni (*b*) при різних значеннях густин дислокацій, а саме  $\rho_D = 0$ ,  $\rho_D = 10^{12} \text{ м}^{-2}$ ,  $\rho_D = 10^{14} \text{ м}^{-2}$ ,  $\rho_D = 10^{16} \text{ м}^{-2}$ . Розрахунки проведені для зразку сплаву Fe-20%Cr-8%Ni товщиною  $\ell = 400 \text{ нм}$  з кроком різницевої схеми  $\Delta x = \ell / (2N + 1) \approx 0,333 \text{ нм}$  по просторовій

координаті  $x$  ( $N = 600$ ) при температурі  $T = 400^\circ\text{C}$ , швидкості продукування радіаційних точкових дефектів  $K_0 = 10^{-6}$  зна/с і набраній дозі  $D = 10$  зна.

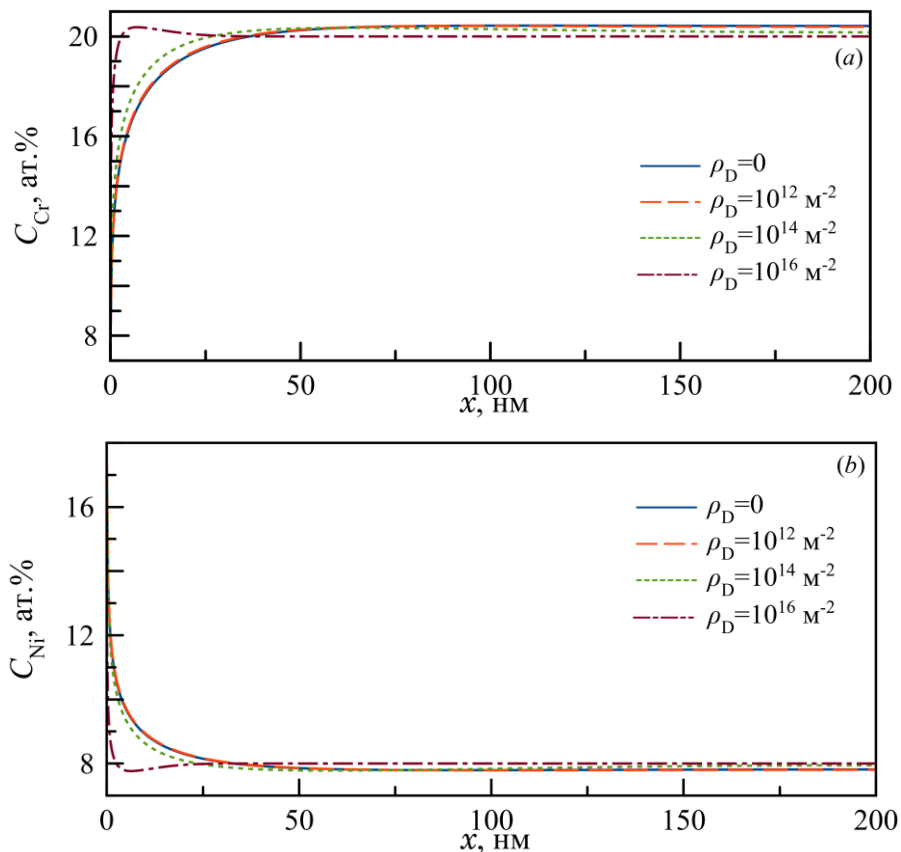


Рис. 1. Залежності концентрацій Cr (a) і Ni (b) від відстані до поверхні при різних значеннях густин дислокацій.

#### Список використаних джерел

1. Коропов О.В., Скороход Р.В. Диференціальні рівняння радіаційно-індукованої сегрегації в N-компонентних концентрованих металевих стопах. *Матеріали ІХ Міжнар. наук.-практ. конф. «Математика в сучасному технічному університеті»* (Київ, 28-29 грудня 2020 р.) Вінниця: Видавець ФОП Кушнір Ю.В., 2021. С. 80-89.
2. Скороход Р.В., Коропов О.В. Математична модель радіаційно-індукованої сегрегації в концентрованих металевих сплавах Fe-Cr-Ni. *Матеріали VIII Міжнар. наук.-практ. конф. «Математика в сучасному технічному університеті»* (Київ, 27-28 грудня 2019 р.) Вінниця: Видавець ФОП Кушнір Ю.В., 2020. С. 153-160.
3. Скороход Р.В., Коропов А.В. Моделирование радиационно-индуцированной сегрегации в сплавах Fe-Cr-Ni. *Физика твердого тела*. 2019. Том 61. Вып. 12. С. 2281-2288.
4. Aitkaliyeva A., He L., Wen H., Miller B., Bai X.M., Allen T. Irradiation effects in Generation IV nuclear reactor materials. In *Woodhead Publishing Series in Energy: N.106. Structural Materials for Generation IV Nuclear Reactors* / Ed. by P. Yvon. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2017. P. 253-283.
5. Bullough R., Newman R.C. The kinetics of migration of point defects to dislocations. *Rep. Prog. Phys.* 1970. Vol. 33. No. 1. P. 101-148.
6. Skorokhod R.V., Buhay O.M., Bilyk V.M., Denysenko V.L., Koropov O.V. Моделирование радиационно-индукованої сегрегації в бінарних сплавах. *Східно-європейський фізичний журнал*. 2018. Том 5. № 1. С. 61-69.
7. Was G.S. *Fundamentals of Radiation Materials Science: Metals and Alloys* (2<sup>nd</sup> ed.). New York: Springer-Verlag, 2017. 1002 p.

**Стародуб С. С.**  
кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник,  
**Лебедь О. А.**  
кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
*starodubss@gmail.com*

## **АКТУАЛЬНІ КОМПАКТНІ ДЖЕРЕЛА РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

Рентгенівські промені є дуже важливим інструментом для наукових досліджень в галузі фізики, хімії, біології та медицини. Вони також стали необхідними для широкого спектра соціальних застосувань, від неруйнівного контролю в сфері безпеки або в промисловості до медичної візуалізації та лікування. Ці області застосування виправдовують нинішній інтерес до розробки компактних, стабільних, економічних і джерел випромінювання мікрометричних розмірів високої та середньої потужності як альтернативи традиційним рентгенівським трубкам і синхротронним установкам [1]. Застосування різних методик отримання рентгенівського зображення об'єкту дослідження накладає свої вимоги до характеристик джерел випромінювання. Так, реалізація рентгенівського фазового контрасту методом вільного поширення потребує параметрів випромінювання (монохроматичність, когерентність, інтенсивність), які аналогічні лазерному випромінюванню в оптичному діапазоні.

Почнемо наш огляд з наймініатюрніших джерел (від 400 до 700 грамів) рентгенівського випромінювання виробництва Newton Scientific [2]. Це мініатюрні рентгенівські моноблоки M25, M47, M54 і M237 є прецизійними генераторами рентгенівського випромінювання з робочим діапазоном від 4 кВ до 70 кВ і рівнями потужності від 2 до 10 Вт. Вони розроблені для додатків, що вимагають невеликих розмірів і низького енергоспоживання. Джерело включає мініатюрну герметичну рентгенівську трубку з торцевих вікном пропускового типу і високовольтне джерело живлення, укладене в один захищений від випромінювання блок. Джерело розроблено спеціально для використання в якості компонента портативного або настільного рентгенівського приладу. Основні характеристики найстаршої моделі наступні. Металокерамічна трубка з напругою 35-70 кВ, зі струмом 5-200 мкА, потужність до 10 Вт, катод у вигляді вольфрамової нитки, рентгенівське вікно з берилію. Типовий потік  $10^6$  photons/(s mm<sup>2</sup>), фокальна пляма біля 2мм.

Наступний вид компактного джерела на мікрофокусній герметичній трубці. Одним з представників такого типу є MicroMax-003 - це японський рентгенівський генератор третього покоління, що складається з щільно пов'язаного генератора мікрофокусів і спеціально розробленої конфокальної багатошарової оптики, що забезпечує надзвичайно низькі експлуатаційні витрати [3]. Розміри приладу з найбільшої сторони менш за 50см. Фокус джерела 100мкм, потужність 30Вт. Ще більш досконалим виглядає німецьке джерело I $\mu$ S DIAMOND – це нова мікрофокусна герметична трубка з унікальною анодною технологією: гібридний алмазний анод, який використовує промислову алмазну підкладку в якості радіатора [4]. I $\mu$ S DIAMOND поєднує в собі цю нову анодну технологію з багатошаровою оптикою Montel останнього покоління, щоб сформуванати найбільш інтенсивне мікрофокусне джерело з герметизованою рентгенівською трубкою для дифракційних застосувань. Тепер він доступний для випромінювання Cu, Mo і Ag. Щільність потоку 2-55x10<sup>9</sup> фотонів/(с мм<sup>2</sup>), розмір плями 80-100 мкм.

Джерелами мікрофокусного рентгенівського випромінювання з обертаючим анодом є ще більш потужними. Їх широко використовують в домашніх лабораторіях для кристалографії білків, для кристалографії малих молекул, мікродифракції, фазово-

контрастного зображення. У поєднанні з високоефективною багатошаровою оптикою цей тип джерел забезпечує щільність потоку, яка приблизно на порядок вище в порівнянні з мікрофокусними герметичними трубками, в результаті чого інтенсивність потоку близька до інтенсивності, одержуваної на лініях синхротронного пучка другого покоління. Одним з представників цього виду є MicroMax 007 HF вище згаданої японської компанії Rigaku. Ця установка вміщається на 1 квадратному метрі та забезпечує фокусну пляму менш за 100мкм. Інший прилад з обертаючим анодом створила американська компанія Bruker [5] під назвою TURBO X-RAY SOURCE (TXS). Цей прилад дозволяє отримати роздільну здатність від 22 до 2 Å, з тривалістю витримки 0,5с/град.

Унікальними виглядають джерела з анодом у вигляді струменю рідкого металу MetalJet виробництва Шведської компанії Excillum [6]. Прилади на основі струмінєвого анода значно перевершують класичні джерела рентгенівського випромінювання з твердим анодом, особливо в діапазоні розмірів мікрофокусної рентгенівської плями, від 5 до декількох десятків мкм. Для прикладу, характеристики MetalJet D2+ наступні. Розмір плями 20 мкм, пікова яскравість  $2,9 \times 10^{10}$  фотонів/(с мм<sup>2</sup> мкрад), з енергією фотонів 9,2кеВ.

Окремої доповіді потребує огляд джерел на вільних електронах (FLASH, PETRA III) [7], джерел на зворотному комптонівському розсіюванні [8] та джерел на базі прискорювачів іонів.

#### Список використаних джерел

1. Martín, L., Benlliure, J. et al. Improved stability of a compact vacuum-free laser-plasma X-ray source. *High Power Laser Science and Engineering*. 2020. Vol.8, E18, 9 pages.
2. URL: <http://www.newtonscientificinc.com/> (дата звернення 24.03.2021)
3. URL: <https://rigaku.com/products/sources/mm003> (дата звернення 24.03.2021)
4. URL: <https://www.incoatec.de/ims-diamond> (дата звернення 24.03.2021)
5. URL: <https://www.bruker.com/> (дата звернення 24.03.2021)
6. URL: <https://www.excillum.com> (дата звернення 24.03.2021)
7. URL: <https://www.desy.de> (дата звернення 24.03.2021)
8. Hornberger, B.; Kasahara, J. et al. A Compact Light Source Providing High-Flux, Quasi-Monochromatic, Tunable X-Rays in the Laboratory. *In Proc. SPIE 11110, Advances in Laboratory-based X-Ray Sources, Optics, and Applications VII*. 2019. 1–13.

**Тилик С. В.**

магістрант, спеціальність «014 Середня освіта (Фізика)»,

**Кузьменко Г. М.**

кандидат педагогічних наук, доцент,

Полтавський національний педагогічний університет імені В. Г. Короленка

*tylyksvatoslav@gmail.com*

#### ЕЛЕМЕНТИ ІСТОРИЗМУ

#### ЯК ЗАСІБ РОЗВИТКУ ІНТЕРЕСУ УЧНІВ ДО ФІЗИКИ

Базовим компонентом природничо-математичної освіти виступає фізика, в процесі навчання якої формується науковий світогляд учня та розвиваються його розумові здібності. Проте, наявний рівень мотивації навчання фізики в учнів можна назвати однією з проблем сучасної школи. Її актуальність підтверджується тенденцією до зниження кількості вступників у заклади вищої освіти на фізичні спеціальності, а також бажаючих скласти ЗНО з цього предмету.



Поряд з іншими, більш високотехнологічними, методами, на нашу думку, ще недостатньо розкритий потенціал такого шляху вирішення цієї проблеми як використання елементів історії фізики на уроках та позаурочних заходах. Питання історії фізики і методів застосування історизму на уроках фізики були висвітлені в роботах Д.Ф. Араго, Я.Г. Дорфмана, Г.Г. Кордуна, Б.І. Спаського, Ю.А. Храмова та ін.

У практичній діяльності вчителі іноді намагаються привернути увагу учнів, звертаючись до історичних фактів. Але слід уникати хибної практики презентації роботи великих вчених у вигляді курйозних і інколи, як може здатися, абсурдних розповідей та легенд, потішних відомостей, що може викликати скептичне ставлення до фізиків як науковців. З іншого боку, використання і такого типу відомостей може бути корисним і є «реперними точками» у історичному відліку фізики, наприклад, всім добре відомі легенди про вигук «Еврика!» Архімеда чи яблуко Ісаака Ньютона та роль цих, на перший погляд, дрібниць у побудові простих механізмів та створенні класичної механіки. Однак вплив подібної інформації має зовнішній ефект подібно до того як будь-які сенсації з повсякденного життя можуть викликати лише короточасну цікавість. Для того щоб пробудити системний інтерес у школярів до фізики, потрібно розкрити становлення й розвиток усієї науки від її зародження до сучасності і поглибити знання за допомогою висвітлення основних фізичних понять і законів у їх історичному розвитку [1].

У змісті історичних повідомлень слід звертати увагу на те як виникла у вченого та чи інша ідея чи припущення, який був хід його думок, їх обґрунтування та метод дослідження. Наприклад, говорячи про створення спеціальної та загальної теорії відносності, слід пояснити, чому Анрі Пуанкаре і Гендрік Лоренц не вбачали в нових перетвореннях координат простору-часу реальних властивостей простору і часу як ізотропних складових Всесвіту, який ми спостерігаємо; чому Альберт Ейнштейн вірив в універсальність цього принципу відносності як для макро-, так і для мікросвіту, звернув на це увагу і зумів це довести [2]. У ході демонстраційного експерименту, наприклад, з явищем електромагнітної індукції ми розповідаємо як непросто було зафіксувати Майклу Фарадею появу індукційного струму.

Очевидно, що обмеженість начального часу не сприяє широкому впровадженню такої методики. Тому вчителю доведеться шукати шляхи для її інтеграції у навчальний процес, такі як позакласні заходи, а також поєднання з проблемним і діяльнісним підходами. Прикладом останнього може бути застосування задач історичного спрямування.

Задача 1. У 1849 р французький фізик Іполит Луї Фізо розробив метод для визначення швидкості світла і провів наступний дослід. Світло від джерела падало на дзеркало, розташоване на відстані  $s = 3,733$  км, і, відбиваючись, потрапляло в око спостерігача. Швидко обертаючись, зубчастий диск, що пропускав порцію світла, за час  $t$ , протягом якого світло йшло до дзеркала і назад, міг обернутися так, що загороджував своїм найближчим зубцем шлях відбитого світла і спостерігач не бачив його. Яке значення швидкості світла було отримано в цьому досліді, якщо диск, який має  $N = 720$  зубців, обертався зі швидкістю  $n = 29,2$  об/с [3] ?

Задача 2. Для вимірювання сталої Авогадро французький фізик Ж. Перрен використав розподіл частинок водної емульсії фарби гумігут. Густина частинок гумігугу становить  $1210$  кг/м<sup>3</sup>, а їхній радіус  $r = 0,47$  мкм. Встановити зміну висоти, при якій концентрація частинок гумігугу зменшувалась в 2 рази.

В умовах дистанційного або змішаного навчання доцільно включати до завдань міні-вікторини, розроблені на платформах «Quizizz» або «Kahoot!», з питаннями пов'язаними з історією науки. В межах виконання дослідницьких проєктів учні можуть відтворювати

деякі історичні експерименти відомих вчених. Подібні історичні вкраплення доцільні й в інших формах навчально-виховної роботи.

Усім запропонованим різноманітним методам ми створюємо процес тривалого, цілеспрямованого та доцільного психолого-педагогічного впливу, в результаті якого стимулюємо інтерес до фізичної науки, адже після уявного потрапляння в ситуації, які приводили вчених до відкриттів, в учнів формується науковий спосіб мислення, повага до науки і відповідно інтерес до неї.

#### **Список використаних джерел**

1. Кордун Г. Г. Історія фізики : навчальний посібник для студентів педагогічних інститутів та університетів : 3-тє вид., перероб. і доп. Київ : Вища школа, 1993. 280 с.
2. Перельман М. Е. Наблюдения и озарения или как физики выявляют законы природы. От Аристотеля до Николы Теслы. Москва : URSS : ЛИБРОКОМ, 2012. 212 с.
3. Бегишева Е. В. Задачи по физике с историческим содержанием. URL : <https://nsportal.ru/shkola/fizika/library/2013/08/30/zadachi-po-fizike-s-istoricheskim-soderzhaniem> (дата звернення: 30.03.2021).

**Ткач В. С.**

асистент,

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",

м. Київ, Україна

*vstkach-ipt@lil.kpi.ua*

### **ОСОБЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ДИСТАНЦІЙНОЇ ФОРМИ НАВЧАННЯ В КПІ ІМ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО**

Формування інтелектуального, наукового та творчого потенціалу суспільства забезпечує освіта. Протягом року, відтоді як запровадили карантин 12.03.2020р й заборонили відвідування закладів вищої освіти, багатьом ЗВО довелося переводити навчальний процес повністю у дистанційну форму. Не став виключенням і Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського - де під дистанційною освітою розуміють добре організовану й контрольовану самоосвіту з використанням комп'ютерної техніки й комунікаційних мереж. В Україні вона (дистанційна освіта) існує десь приблизно з 1998 року. Вперше таку форму освіти в КПІ запровадили в 2001 році - створили Український центр дистанційної освіти, який у грудні 2004 року було реорганізовано в Український інститут інформаційних технологій в освіті (УІТО) при КПІ [1, с. 2].

Перевагами дистанційного навчання вважають можливість навчатися в зручному місці та в зручний час. З іншого боку, до організації дистанційного навчання висуваються відповідні вимоги, серед яких найвагоміші:

- наявність високоякісних електронних навчально-дидактичних матеріалів;
- досвідченість викладачів у створенні та використанні веб-ресурсів у навчальному процесі.

Саме завдяки забезпеченню цих двох вимог в КПІ НМК «Інститут післядипломної освіти», до складу якого входить УШТО дистанційна провадиться освіта на високому рівні.

До інформаційно-комунікаційних технологій, які використовують викладачі та студенти входять й власно розроблені платформа дистанційного навчання Сікорський (Sikorsky Distance Learning Platform) та "Електронний кампус" (продукт для адміністрування освітнього процесу). Ці продукти постійно активно розвиваються та розширюють свої можливості, відповідаючи на запити сьогодення. Платформа дистанційного навчання «Сікорський» (Платформа «Сікорський») - це відкрите віртуальне навчальне середовище КПІ ім. Ігоря Сікорського, яке надає адміністраторам, викладачам та студентам широкі можливості щодо застосування сучасних технологій дистанційного навчання, розроблення веб-ресурсів навчальних дисциплін, організації інтерактивної взаємодії між викладачами та студентами, а також управління дистанційним навчальним процесом. Платформа базується переважно на спеціалізованому веб-середовищі Moodle (Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment – модульне об'єктно-орієнтоване динамічне навчальне середовище) та G Suite for Education та на інших програмних продуктах, що допомагають в реалізації дистанційного навчання. Провідними динамічними частинами платформи є насамперед лекції та тестові завдання, а також глосарій та інструменти, що забезпечують комунікацію у вигляді семінарів, відеоконференцій, форумів та чатів. [2, с.1]

Під час переходу до дистанційного навчання замість звичного викладання біля дошки деяким викладачам долати труднощі із опануванням новітніх технологій сприяв і продовжує підтримувати НМК «Інститут післядипломної освіти» КПІ ім. Ігоря Сікорського, шляхом підвищення кваліфікації за наступними темами: “Створення і використання веб-ресурсів навчальної дисципліни”, “Загальний курс ІТ для користувачів”, “Використання розширених сервісів Google для навчальної діяльності”, “Розроблення дистанційних курсів з використанням платформи Moodle”, “Організація дистанційного навчання за допомогою Microsoft Teams”, “Управління власним інформаційним середовищем засобами сервісу Notion для викладачів та науковців”, “Створення відео контенту дистанційного навчання”, “Створення фото, відео, анімації для підтримки навчання”, “Прості засоби створення та підтримки WEB-сторінки викладача” тощо.

За рік дистанційного навчання в умовах карантину, наголошує проректор з навчальної роботи КПІ ім. Ігоря Сікорського А.Мельниченко, ми оцінили можливості університету та окреслили перспективи розвитку. В результаті аналізу ситуації можна стверджувати, що КПІ, завдяки наявній базі та практиці реалізації інноваційних форм навчання, може забезпечити якість навчання в дистанційному режимі, використовуючи власні ресурси та створені продукти – "Електронний кампус" (для адміністрування освітнього процесу) та платформу дистанційного навчання "Сікорський" (для реалізації освітнього процесу). [3, с.2].

#### **Список використаних джерел**

1. URL: <https://kpi.ua/newspaper/2008/5> (дата звернення: 05.04.2021)
2. URL: <https://www.sikorsky-distance.org/> (дата звернення: 07.04.2021)
3. URL: <https://kpi.ua/newspaper/2020/15> (дата звернення: 07.04.2021)

**Трофименко Я. В.**  
молодший науковий співробітник,  
**Хелемеля О. В.**  
кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник,  
**Калінкевич О. В.**  
молодший науковий співробітник,  
**Калінкевич О. М.**  
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,  
**Данильченко С. М.**  
кандидат фізико-математичних наук, зав. відділу,  
Інститут прикладної фізики НАН України  
*ja.v.trofimenko@gmail.com*

**ВПЛИВ НИЗЬКОІНТЕНСИВНОГО РЕНТГЕНІВСЬКОГО  
ВИПРОМІНЮВАННЯ НА МЕРИСТЕМУ КІНЧИКІВ КОРЕНІВ  
*ALLIUM CERA***

Актуальним питанням сьогодення залишається вплив малих доз рентгенівського випромінювання на біологічні об'єкти з подальшим дослідженням позитивних і негативних наслідків. Існує ряд сучасних молекулярно-біологічних тестів, але в силу високої технологічної складності і вартості їх використання обмежене. Спостереження за розвитком кореневої системи *Allium cerea* показало, що цю рослину можна використати як інструмент для дослідження впливу низькоінтенсивного опромінення [1] (за аналогією із цитотоксичністю за даними ВООЗ [2]).

У якості джерела опромінення використовували рентгенівську трубку з молібденовим анодом в режимі роботи 20 kV 0,1 mA, час експозиції 20 та 40 хв. Після чого пророщували цибулини в стандартних умовах протягом 3-5 діб. Для дослідження меристеми використовували корінці, які фіксували фіксатором Кларка. Готували давлені препарати, забарвлювали ацетокарміном, досліджували під мікроскопом Carl Zeiss Primo Star (збільшення в 1000 разів). Для оцінки цитотоксичної дії низькоінтенсивного рентгенівського опромінення проводили розрахунок мітотичного індексу.

Значення мітотичного індексу свідчить про нормальне протікання мітозу, про пригнічення процесу поділу клітин або, навпаки, посилення мітотичної активності тканин. На підставі цього робиться висновок про мітотоксичну або мітозостимулюючу дію досліджуваного фактора. Мітотичний індекс дослідженого матеріалу складав 54,3% в контролі, 62% - в опромінених зразках впродовж 20 хв. і 41% - при 40 хв.

*Таблиця 1.*

**Фазні індекси, %**

Зразки коренів	Профаза	Метафаза	Анафаза	Телофаза
Контроль	85,7	5,7	2,8	5,8
Опромінені 20 хв	90,6	5,1	1,1	3,24
Опромінені 40 хв	91,5	4,6	0,8	3,1



*Рис. 1. Клітини меристеми коренів Allium cepa на різних стадіях мітозу*

Висновки. Клітини меристеми кінчиків коренів *Allium cepa* можна використовувати у якості чутливої системи для оцінки впливу низькоенергетичного рентгенівського випромінювання на живі організми.

#### Список використаних джерел

1. Atacı G., Türkoğlu Ş. The investigation of toxic, genotoxic and cytotoxic effects of various nanoparticles in *Allium cepa* and *Caenorhabditis elegans* test systems. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 2020. Vol. 5(1). P. 16-35.
2. *Руководство по краткосрочным тестам для выявления мутагенных и канцерогенных химических веществ*. Женева: Всемирная организация здравоохранения, 1989. 211 с.

**Трофименко Я. В.**

молодший науковий співробітник,

**Хелемеля О. В.**

кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник,

**Калінкевич О. В.**

молодший науковий співробітник,

**Калінкевич О. М.**

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,

**Данильченко С. М.**

кандидат фізико-математичних наук, завідувач відділу,

Інститут прикладної фізики НАН України,

м. Суми, Україна

**Скляр А. М.**

кандидат хімічних наук, доцент,

Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка

*ja.v.trofimenko@gmail.com*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НИЗЬКОІНТЕНСИВНОГО РЕНТГЕНВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ ТА ДЕКОРАТИВНІ КУЛЬТУРИ

Радіаційні технології здатні вирішити багато актуальних питань імпортозаміщення та продовольчої безпеки, конкурентоспроможну, економічно ефективні, екологічно безпечні технології виробництва, зберігання і переробки сільськогосподарської і харчової продукції.

Радіаційні технології в даний час знаходяться на порозі принципово нового етапу розвитку та застосування.

Відомо, що опромінення насіння, цибулин, бульб сільськогосподарських і декоративних культур низькоінтенсивним рентгенівським випромінювання може підвищувати схожість, стимулювати ріст і розвиток рослин, покращувати якісні та кількісні характеристики врожаю, а також збільшувати опірність рослин до несприятливих умов середовища. Дослідження впливу випромінювання низької інтенсивності дуже важливе.

В роботі було проведено дослідження впливу рентгенівського випромінювання на проростання насіння та розвиток проростків ряду культур з метою визначення відгуку окремих видів для подальшої роботи. Для дослідження використали 3 групи рослин: посівний матеріал, який опромінювали на установці Rhywe X-Ray з Mo-трубкою в режимі 20 kV 1mA. впродовж 20 хв., посівний матеріал опромінений в тому ж режимі і оброблений розчином хітозану (використовують як стимулятор росту рослин, для захисту від шкідників та як радіопротектор) та контроль. Попередні дані занесені до таблиці 1. Для петрушки, кропу, томатів, моркви, редиски Рубін, гарбуза і чорнобривців спостерігаємо дружність проростання, стимулювання росту, інтенсивність приросту зеленої маси.(див. Рис. 1) Для буряка і полуниці низькоінтенсивне опромінення було чи не єдиним способом для проростання насіння.

Таблиця 1.

**Візуальна оцінка росту та розвитку рослин**

Вид/Сорт	Контроль	Опромінення	Опромінення + хітозан
Петрушка	+	++	Не проводили
Кріп	+	++	+++
Томати	+	+++	Не проводили
Морква	+	++	+++
Буряк	–	+	+
Горох	+++	++	++
Редиска «Рубін»	+	+++	++
Редиска «Червоний кінчик»	+++	+	++
Спаржева квасоля	+	–	+
Кукурудза	+++	++	+
Гарбуз	+	++	–
Томати кімнатні	+	+++	++
Полуниця	–	+	++
Чорнобривці	+	++	+++
Мак декоративний	+++	+	–
Руелія	+++	+++	+++

« + » - оцінка за дружністю проростання та інтенсивністю росту.

« – » - не зійшли або швидко загинули.



*Гарбуз*



*Петрушка*

*Рис. 1. Приклад позитивного впливу низькоінтенсивного рентгенівського випромінювання (на обох фотографіях праворуч – опромінені рослини, ліворуч – контроль).*

Крім позитивних результатів спостерігаємо пригнічення сходів і росту, зокрема для Редиски Червоний Кінчик, кукурудзи та маку декоративного (див. Рис. 2).

Результати цих досліджень є основою інтерпретації позитивних для агропромислового виробництва ефектів (компетенцій) для ряду культур, які можуть бути досягнуті з використанням радіаційних технологій. Необхідні прикладні дослідження і технічні розробки. Серед прикладних задач слід виділити: необхідність модернізації та розробки стаціонарних і мобільних установок для опромінення в складі багатофункціональних радіаційно-технологічних комплексів або вбудованих в технології з виробництва, переробки і зберігання продукції; відпрацювання регламентів обробки продукції та їх виробнича апробація.



*Рис. 2. Рослини маку. Приклад негативного впливу опромінення. На фото праворуч – опромінені рослини, ліворуч – контроль*

#### **Список використаних джерел**

1. *Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы*: сборник докладов международной научно-практической конференции, Обнинск, 26-28 сентября 2018 г. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2018. 356 с.

Хелемеля О. В.

кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
Суми, Україна  
oleksiiKhel@gmail.com

## УРАХУВАННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЗНАКУ ЗАРЯДУ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ ВАЖКОЇ ЗАРЯДЖЕНОЇ ЧАСТИНКИ

Досліджено в рамках квантово-польового підходу взаємодію важкої зарядженої частинки з електронним газом з урахуванням другого борнівського наближення, що дало можливість врахувати у виразі для енергетичних втрат залежність від знаку заряду іона. Отримано аналітичний вираз для реальної частини функції Гріна.

В теорії взаємодії заряджених частинок існує проблема врахування знаку заряду у виразі для енергетичних втрат. При врахування першого борнівського наближення та в ряді класичних теорій енергетичні втрати містять квадратичну залежність  $Z^2$  [1-4]. Для врахування залежності від знаку заряду гальмівної здатності електронного газу необхідно врахувати наступні поправки в розвиненні, що містять в собі члени із  $Z^3$  [5].

В цьому випадку члени, що містять  $Z^3$  пропорційні [6]

$$-\frac{dE_{z3}}{dt} \propto \int d^3k \int d^3k_1 \operatorname{Im} (G_0(\mathbf{k}, \mathbf{k}_1, w, w_1) \varepsilon_{\mathbf{k}}^{-1} \varepsilon_{\mathbf{k}_1}^{-1} \varepsilon_{\mathbf{k}-\mathbf{k}_1}^{-1}), \quad (1)$$

де  $G_0(\mathbf{k}, \mathbf{k}_1, w, w_1)$  – трьохчастинкова функція Гріна,  $\varepsilon_{\mathbf{k}}$  – діелектрична функція електронного газу. Як видно з виразу  $dE_{z3}/dt$  представляє собою комбінацію уявної та реальної частин трьохчастинкової функції Гріна та діелектричних функцій. Так реальна частина трьохчастинкової функції Гріна має залежність від хвильових векторів та частот у вигляді

$$G(\vec{k}, \vec{k}_1) \rightarrow \exp(-f_1(\mathbf{k}, \mathbf{k}_1, w, w_1)) \exp(-f_2(\mathbf{k}, \mathbf{k}_1, w, w_1)) * \\ * [1 + \operatorname{erfi}(f_1(k, k_1, w, w_1)) \operatorname{erfi}(f_2(k, k_1, w, w_1))] \quad (2)$$

### Список використаних джерел

1. Dikanskii N. S. et al. Influence on the sign of an ion charge on friction force at electron cooling. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1988, №94(65).
2. Хелемеля О.В., Холодов Р.І., Мірошніченко В.І. Діелектрична модель енергетичних втрат важкої зарядженої частинки при русі в холодному замагніченому електронному газі. *УФЖ.* 2013 №58, с.725.
3. Larkin A.I. Passage of particles through a plasma. *J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.)* 1959 №37, p. 264-272.
4. Khelemelya O.V., Kholodov R.I. Quantum field methods in the electron cooling. *Problems Of Atomic Science And Technology*, 2013, N3(85), p.53-57.
5. Dyachenko M.M., Kholodov R.I. Energy losses of positive and negative charged particles in electron gas. *Modern Physics Letters A.* 2017. Vol. 32, No. 6. 1750031.
6. Hu C.D., Zaremba E.  $Z^3$  correction to the stopping power of ions in an electron gas. *Physical review B.* 1988. №37, 16.



**Шуліпа Р. О.**  
молодший науковий співробітник,  
головний інженер комплексної установки,  
**Павленко Ю. А.**  
провідний інженер,  
**Возний В. І.**  
старший науковий співробітник,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
*shulruslan007@gmail.com*

## **ПРИЛАД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЕМІТТАНСУ ПУЧКА ПРОТОНІВ НА ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ «СОКІЛ»**

Сучасні ядерно-фізичні методи дослідження речовини потребують використання достатньо якісних джерел заряджених частинок високих енергій. Одним із таких джерел є прискорювачі заряджених частинок. У Інституті прикладної фізики НАН України (м. Суми) розміщений аналітичний прискорювальний комплекс (АУК) на базі малогабаритного електростатичного прискорювача заряджених частинок горизонтального типу «Сокіл»[1]. Прискорювач являє собою електростатичний генератор Ван де Граафа розрахований на отримання заряджених частинок ( $H^+$ , He) енергією до 2 Мев.

Одними з найважливіших характеристик пучка заряджених частинок є енергетичний розкид та яскравість пучка. Яскравість пучка напряму пов'язана з його еміттансом і залежить від параметрів джерела іонів прискорювача. На даному прискорювачі використовується джерело заряджених частинок на радіо-частотному генераторі. Воно було модернізоване за допомогою постійних магнітів, для підвищення яскравості пучка[2]. Тому одним з важливих завдань є вимірювання еміттансу пучка заряджених частинок на діючій установці. Співробітниками інституту був розроблений, спроектований та створений прилад для вимірювання еміттансу, який складається з плати управління та виводу інформації, модуля для вимірювання струму пучка іонів[3], модуля запису результатів вимірювання та блоків живлення.

### **Список використаних джерел**

1. Малогабаритный электростатический ускоритель на 2 МэВ горизонтального типа / А.Д. Вергунов, Ю.З. Левченко, М.Т. Новиков, В.М. Пистряк, В.Е. Сторижко, С.Я. Чеканов. *ВАНТ Сер. ТФЭ*, 1985, С. 26-28.
2. Возний В.И., Мирошниченко В.И., Мордик С.Н., Сторижко В.Е., Сулкио-Клефф Б. *Возможности повышения плотности плазмы ВЧ-источников ионов*. Збірник наукових праць Інституту ядерних досліджень №1(9). 2003. С. 75-81.
3. Нагорный А.Г.. *Приборы и техника эксперимента*. 2002. №1, С.67-69.

**Bystrik Yu. S.**

Head of the Laboratory,  
Institute of Applied Physics of NAS of Ukraine,  
Sumy, Ukraine  
*yurabystrik@gmail.com*

**Denisov S.**

Associate Professor,  
Oslo Metropolitan University,  
Department of Computer Science,  
Oslo, Norway

## **LIMITING DISTRIBUTION FOR THE XY-MODEL OF BALLISTIC LÉVY WALKS**

A wide range of real-life phenomena demonstrates an anomalous average behavior with non-Gaussian statistics and non-linear diffusion. These phenomena can have a quite different complexity and nature ranging from a scattering of photons in glasses to transport processes in biological organisms or even whole ecosystems. The case of a particular interest consists of systems which exhibit a so-called ballistic diffusion. This type of superdiffusion is characterized by particles spreading for which a variation is proportional to a squared time of random walking. Remarkably, that such time dependence of particles spreading is also inherent to a free motion along a straight line with a constant speed.

A crucial role in research of anomalous transport processes belongs to the conception of Lévy walks which allows us to build models of anomalously fast diffusion with a finite velocity of random walkers [1]. Sometimes for adequate description of such kind of stochastic processes it is enough to use the well-developed theory of one dimensional Lévy walks. However, in general, real-life phenomena with an anomalous behavior can not be decomposed into a set of independent one dimensional Lévy walks. Particularly, biological motility of bacteria or humans, animal foraging, searching with optimal strategies, movement of autonomous robots, elastic collisions of light and heavy particles in an inhomogeneous medium fundamentally occur in two dimensions.

As a consequence of the celebrated central limit theorem, in a classic case of a normal diffusion the geometry of planar random walks does not affect the universal form of the resulting two-dimensional Gaussian distribution of wandering particles. At the same time recently it was shown that statistical properties of planar Lévy walks processes significantly depend on the microscopic patterns of underlying random walks [2]. Investigation and classification of these processes can be done by computation of appropriate statistical moments and the generalized Pearson coefficient which contain information about trajectories of walkers. Nevertheless, a great interest is to find the distribution of an arrangement of a particle launched from the origin taking into account the microscopic geometry of corresponding random walks.

The XY-model of ballistic Lévy walks [2] is represented as a key example of non-uniform Lévy walks processes. It appears in a variety of problems related to diffusion on solid surfaces, Lorentz gases, Hamiltonian diffusion in an egg-crate potential etc. In the indicated model a particle moves with a constant speed only along one axis and in the random moment of time its orientation randomly changes and a particle continues to move in a new allowed direction. Herein, movement times between successive reorientation events distributed with heavy-tailed density which ensures that a mean value and a variance of movement times are infinite.

In this work we study the long-time behavior of the particle displacement for the XY-model of ballistic Lévy walks. We provide analytical calculating of the limiting in time probability density of the walker position by the inversion of the corresponding asymptotic Fourier-Laplace expression for the propagator in the ballistic regime. We also establish its asymptotic properties in important regions and find an exact solution in a particular case. Moreover, we confirm our analytical results by performing a numerical simulation of underlying random walks.

### References

1. Zaburdaev, V., Denisov, S., Klafter, J. (2015). Lévy walks. *Rev. Mod. Phys.*. Vol. 87, no. 2, P. 483-530.
2. Zaburdaev, V., Fouxon, I., Denisov, S., and Barkai, E. (2016). Superdiffusive Dispersals Impart the Geometry of Underlying Random Walks. *Phys. Rev. Lett.* Vol. 117, no. 27, P. 270601.

**Kul'ment'ev A. I.**

Doctor of Physics and Mathematics, Senior research assistant,  
Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of Ukraine  
Sumy, Ukraine  
*kulmentev@ukr.net*

### EXCHANGE OF INFORMATION BETWEEN ADJACENT LEVELS IN MULTI-LEVEL COMPUTER SIMULATION

Today, computer modeling represents the third independent branch in physics, along with traditional laboratory experiments and analytical theory. It is somewhat similar to each of the traditional branches of physics, but, at the same time, it is not reduced to any of them [1].

To describe the behavior of macroscopic systems, the concept of the structural levels of the system is introduced. Each level is characterized by a basic structural element with a certain set of characteristics. It is assumed that there is a physical theory that describes the dynamic behavior of an individual element or the statistical properties of an ensemble of such elements. To date, a large number of computational physics methods have been developed that can be used to model the system at a separate level (Fig. 1).

For a consistent description of the properties and processes in the material as a whole: from the micro to the macro level, it is necessary to learn how to coordinate the methods related to individual levels. This consistency presupposes the possibility of isolating information at a given level, which is important at the next levels, with its subsequent transfer in a closed compact form. And it is here that most of the currently unresolved problems are concentrated.

The work is devoted to establishing the relationship between the defects of the atomic and mesoscopic levels. In this case, the structural components of the mesoscopic level naturally arise in the course of the evolution of the atomic level system, as a result of the isolation of certain stable collective formations. Examples of such formations are vacancy pores, which are formed as a result of the merger of individual structural vacancies, arising, for example, as a result of radiation exposure. The task comes down to detecting the appearance of such a formation and describing its properties as a whole.

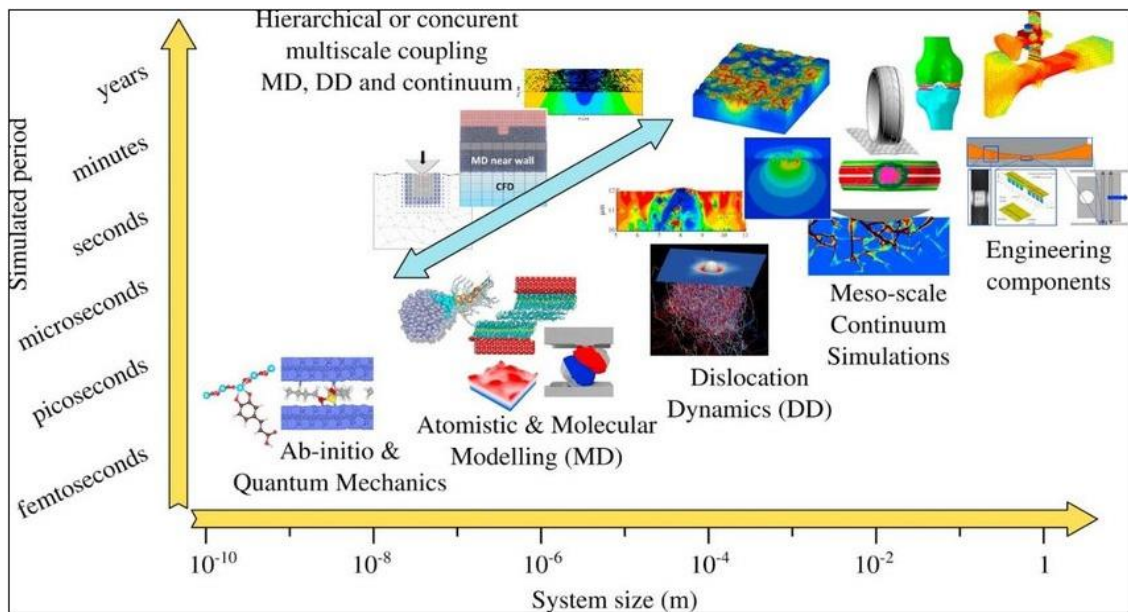


Fig. 1. Sequential multilevel modeling of solids.

A particular case of compact defect formations with a well-defined surface is considered. An original method of identification and analysis of the surface of compact formations, which is based on the concept of rolling on the surface of a probe sphere, is proposed [2]. In this case, the problem is reduced to considering all equilibrium positions of the probe sphere, which rolls over the surface. The atomic nature of the system leads to a natural discretization of the surface under consideration, and the sequential rolling of the test sphere over the unexplored edges ensures the connection of the triangular elements into a single whole. As a result, if the total number of triangular elements is  $N$ , then the cluster is approximated by a polyhedron, and its surface is approximated by a polyhedron. The problem of measuring its arbitrary integral characteristic in a computer experiment is posed and solved. In the work the following applications of the developed method are considered:

- Processes of evolution of integral properties of nanoobjects have been investigated when their size changes or as a result of external influences. Using the example of stable atomic clusters, it is shown that the proposed method correctly reproduces dimensional oscillations and the sequence of magic numbers for equilibrium atomic clusters.
- Nanosized compact defect formations immersed in a crystalline matrix have been considered. A general method is described that makes it possible to detect the appearance of such a formation at the atomic level, determine its outer boundary, and measure the integral characteristics.
- Computer experiments have been carried out on the collapse of a spherical pore. The dependences of the pore shape parameters on the compression ratio were obtained.

This approach can be used not only when performing original scientific research, but also in the educational process in higher educational institutions when performing master's theses.

### References

1. Makov, G., Gattinoni, C., De Vita, A. (2009). Ab initio based multiscale modelling for materials science. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* V.17, №8. P.084008 (17 p.).
2. Кульментьев А. И. Измерение интегральных характеристик атомных кластеров при компьютерном моделировании. *Математическое моделирование.* 2012. Т.24, №3. С. 97-112.

**Білик В.М.**  
молодший науковий співробітник,  
**Калінкевич О.В.**  
молодший науковий співробітник,  
**Калінкевич О.М.**  
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,  
**Данильченко С.М.**  
кандидат фізико-математичних наук, завідувач відділу,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
*v.m.bilyk.sumy@gmail.com*

## **PIXE-АНАЛІЗ МАГНІТНИХ СОРБЕНТІВ НА ОСНОВІ ХІТОЗАНУ ТА МАГНЕТИТУ**

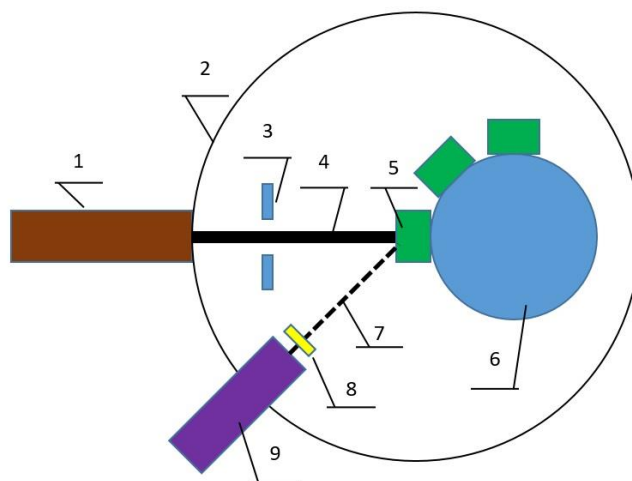
Хітозан – природний полісахарид, похідне хітину, який складає основу панцирів ракоподібних, оболонки комах, грибів. Серед відновлюваних джерел хітозан є одним з найбільш досліджуваних біополімерів зі значним потенціалом для різних напрямків, включаючи медичні, фармацевтичні та біотехнологічні застосування завдяки біосумісності, здатності до біодеградації та низькій токсичності [1, 2]. Надання матеріалам на основі хітозану магнітних властивостей розширить сфери його можливого застосування, наприклад для швидкого та простого відділення мікроорганізмів, для доставки лікарських засобів, для посилення контрастності в магнітно-резонансній томографії тощо. Один із напрямків - створення магнітокерованих сорбентів як для очищення навколишнього середовища, так і для іммобілізації органічних речовин, клітин. В нашій роботі були одержані магнітні намистини на основі хітозану, гідроксиапатиту (основна мінеральна складова кісткової тканини, що також часто використовується як сорбент та матеріал для іммобілізації) та магнетиту. Оскільки при цьому був використаний одностадійний синтез важливо мати інформацію про включення та точну концентрацію відповідних елементів (Fe, Ca, P) в матеріалі, а також про наявність домішок. Елементний склад досліджували методом PIXE (протонно індукована рентгенівська емісія) на базі аналітичного прискорювального комплексу Інституту прикладної фізики НАН України. Для дослідження використовували ліофільно висушені зрізи намистин. Швидкий багатоелементний аналіз методом PIXE зараз широко використовується у багатьох областях науки та практики, включаючи хімію, медицину, біологію, археологію, сільське господарство, матеріалознавство, геологію, петрологію, екологічні дослідження, моніторинг забруднення, пошук ресурсів, напівпровідники, метали, у астрофізиці, науках про Землю, у криміналістиці та харчовій індустрії [3].

Дослідження проводились у вакуумній камері при тиску залишкових газів порядку  $3 \cdot 10^{-3}$  Па. Аналіз проводився на пучку протонів з енергією в 1 МеВ. Струм іонного пучка складав 30 нА. Схема установки зображено на Рис. 1.

Даною методикою можливо виявляти елементи в діапазоні від Na до Pu. При дослідженнях використовувався поліетилентерефталатний фільтр з отвором діаметром в 0,25 мм, що дозволяє реєструвати всі вищезгадані елементи.

Рис. 1. Схематичний вигляд установки PIXE для аналізу.

1. Іонопровід
2. Камера аналізу
3. Запираючий електрод
4. Пучок протонів
5. Зразок
6. Поворотний тримач зразків
7. Рентгенівське випромінювання
8. Фільтр
9. Детектор рентгенівського випромінювання (Amptek XR100 – SDD)



Хоч даний метод не чутливий до елементів самого хітозану (С, N, O, H), натомість дуже чутливий до домішок. Намистини із хітозану містять багато домішкових елементів, що пов'язано з процедурами виділення хітозану в природних джерел та безпосередньо з джерелами хітозану (оскільки хітин легко та міцно зв'язує ряд елементів, вони можуть накопичуватися в природних джерелах хітозану, Рис. 2). Намистини з магнетитом характеризуються великим вмістом заліза, а намистини з фосфатами кальцію містять кальцій і фосфор в значних кількостях. Намистини, що містять як магнетит, так і кальцій-фосфати, містять всі три елементи, що свідчить про утворення в процесі синтезу всіх необхідних компонентів.

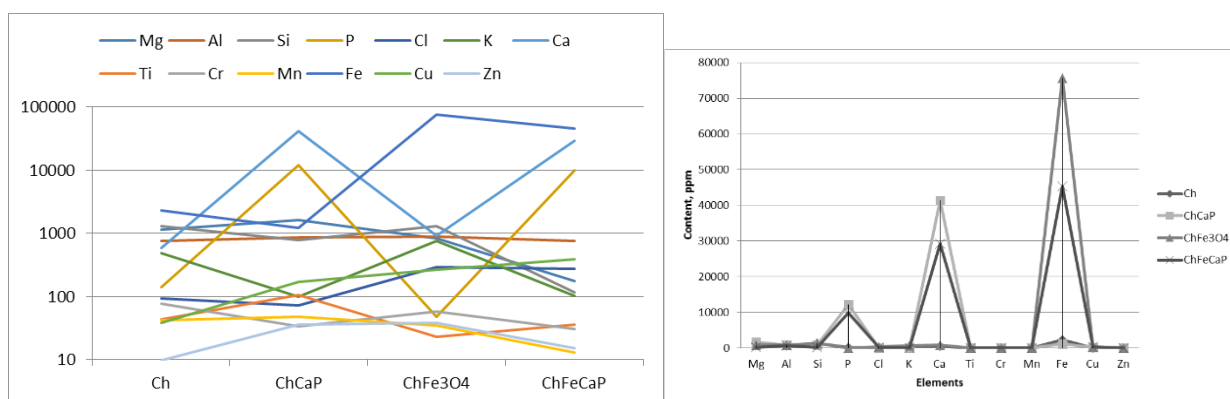


Рис. 2. Кількість елементів (ppm) в залежності від допантів хітозану (гідроксиапатит, магнетит, гідроксиапатит+магнетит)

#### Список використаних джерел

1. Kou S., Peters L., Mucalo M. Chitosan: A review of sources and preparation methods. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.12.005
2. Cheung R.C., Ng T.B., Wong J.H., Chan W.Y. Chitosan: an update on potential biomedical and pharmaceutical applications. *Marine Drugs*, 2015. Vol. 13(8). P. 5156-5186. DOI: 10.3390/md13085156
3. Ishii K. PIXE and its applications to elemental analysis. *Quantum Beam Science*, 2019. Vol. 3(2). P. 12. DOI: 10.3390/qubs3020012

**Калінкевич О. В.**  
молодший науковий співробітник,  
**Калінкевич О. М.**  
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,  
**Зінченко Є. І.**  
молодший науковий співробітник,  
**Чіванов В. Д.**  
кандидат біологічних наук, заступник завідувача відділу,  
**Данильченко С. М.**  
кандидат фізико-математичних наук, завідувач відділу,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
м. Суми, Україна  
*oksana.kalinkevich@gmail.com*

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАКОПИЧЕННЯ ВОДНЮ В МЕДИЧНИХ ІМПЛАНТАТАХ З Ti-Zr СПЛАВІВ З МОДИФІКОВАНОЮ ПОВЕРХНЕЮ ЗА УМОВ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО НАВОДНЕННЯ

Сплави на основі титану завдяки низькій густині, біосумісності і високій корозійній стійкості широко використовуються в медицині, суднобудівництві, авіакосмічній і хімічній техніці. Сплав Ti-Zr широко використовується в біомедицині для створення імплантатів, зокрема зубних. Разом з тим сплави на основі титану є гідридоутворюючими, проникнення водню в глибину матеріалу призводить до зниження пластичності, тріщиностійкості і як наслідок – до руйнування [1, 2]. Зубні імплантати піддаються дії водню, що призводить до їх руйнування раніше закінчення строків експлуатації. Джерелом водню в імплантатах є водень, що міститься в людському організмі, зубних пастах. Вирішення проблеми водневої крихкості потребує дослідження особливостей накопичення і розподілу водню в імплантатах з одного боку і створення захисту від проникнення водню вглиб матеріалу з іншого. Актуальним є пошук інгібіторів наводнення. Такі дослідження мають значення для розвитку як фундаментальної, так і прикладної науки і є актуальними.

В нашій роботі було проведено модельне електролітичне насичення зразків імплантів з титан-цирконієвого сплаву та аналогічних імплантів з кальцій-фосфатним покриттям (нанесеним плазмово-електролітичним методом [3]) та органічним хітозановим покриттям (спін-покриття). В якості електроліту використовували 1М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, електроліз проводили протягом 3 год при щільності струму 20 мА/см<sup>2</sup>, температурі не вище 20 °С. Імплантати використовували як катод (катодне насичення). Вихід водню після електролітичного наводнення визначали методом термопрограмованої десорбційної мас-спектрометрії.

Метод плазмово-електролітичної оксидації (ПЕО) дає змогу одержати на титанових імплантатах рентгеноаморфні пористі покриття з розвиненим мікрорельєфом (Рис. 1). Таке покриття підвищує біосумісність та корозійну стійкість імплантатів.

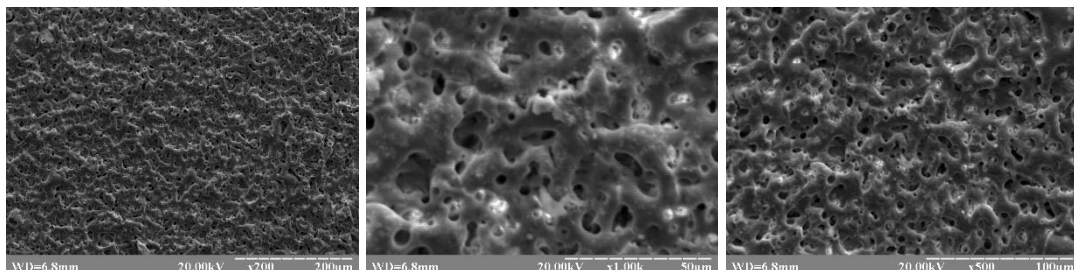


Рис. 1. ПЕО-покриття на імплантатах



Хітозан – біологічний полімер, має широке медичне застосування. Може бути використаний як інгібітор корозії [4]. Хітозанове покриття наносили методом центрифугування. При цьому хітозан формував тонку плівку на поверхні ПЕО-покриття, дещо згладжуючи, але не руйнуючі мікрорельєф (Рис.2).

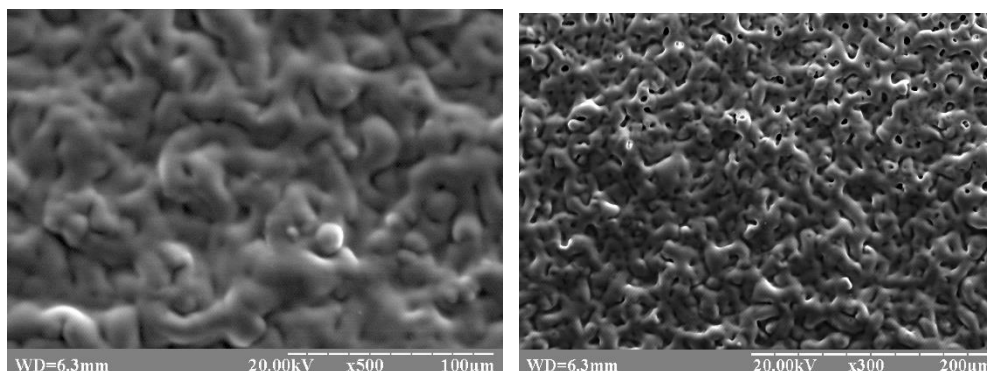


Рис. 2. Хітозанове спін-покриття на ПЕО модифікованій поверхні.

Як видно з Рис. 3, характер залежності виділення водню від температури для наводнених чистих сплавів та сплавів, що містили органо-неорганічне покриття відрізняється. В першому випадку спостерігали низькотемпературне виділення водню 100°C та 300°C, що свідчить про наявність водню в приповерхневих шарах. В другому випадку відсутність таких піків свідчить про слабку адгезію водню та менше його проникнення вглиб матеріалу (високотемпературний пік має меншу інтенсивність).

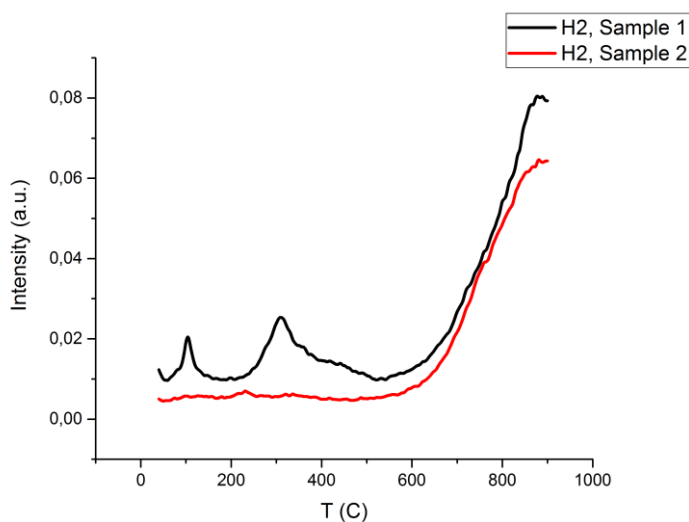


Рис. 3. Профіль виходу водню з зразка 1 (чистий сплав) та зразка 2 (сплав з покриттям)

Таким чином, використання ПЕО та хітозану впливає на розподіл водню в сплавах при експериментальному електролітичному наводненню і потребує подальших досліджень.

#### Список використаних джерел

1. Гельд П.В., Рябов Р.А. *Водород в металлах и сплавах*. Москва: Металлургия, 1974. 272 с.
2. Ливанов В.А., Буханова А.А., Колачев В.А. *Водород в титане*. Москва: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1962. 245 с.
3. Simchen F., Sieber M., Kopp A., Lampke T. introduction to plasma electrolytic oxidation - an overview of the process and applications. *Coatings*, 2020. Vol. 10. P. 628-647. DOI: 10.3390/coatings10070628
4. Yang S., Wen Y., Yi P., Xiao K., Dong C. Effects of chitosan inhibitor on the electrochemical corrosion behavior of 2205 duplex stainless steel. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2017. Vol. 24(11). P. 1260-1271. DOI:10.1007/s12613-017-1518-y



Наукове видання

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

*Присвячена 30-річчю незалежності України*

**МАТЕРІАЛИ**

VII Всеукраїнської науково-практичної конференції  
студентів, молодих учених, науково-педагогічних працівників та фахівців  
з міжнародною участю  
(Суми, 12-14 квітня 2021 року)

**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.**

Суми: Видавництво СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2021 р.  
Свідоцтво ДК № 231 від 02.11.2000 р.

Відповідальний за випуск: **Каленик М. В.**  
Комп'ютерний набір і верстка: **Завражна О.М.**

Здано в набір 20.04.2021. Підписано до друку 26.04.2021.  
Формат 60x84/16. Гарн. Cambria. Друк ризогр. Папір офсет.  
Умовн. друк. арк. 5,8. Обл.-вид. арк. 7,1.  
Тираж 100. Вид. № 20.

Видавництво СумДПУ імені А. С. Макаренка  
40002, м. Суми, вул. Роменська, 87

Виготовлено у видавництві СумДПУ імені А. С. Макаренка