ISSN 2521-6996

Національна академія наук України
Інститут прикладної фізики
Міністерство освіти і науки України
СумДПУ імені А. С. Макаренка

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ, ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ ТА МЕТОДИКИ НАВЧАННЯ ФІЗИКИ

МАТЕРІАЛИ
VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції
з міжнародною участю

24-26 жовтня 2022 року
м. Суми

Національна академія наук України
Інститут прикладної фізики
Міністерство освіти і науки України
СумДПУ імені А. С. Макаренка

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ, ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ ТА МЕТОДИКИ НАВЧАННЯ ФІЗИКИ

Матеріали
VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю

(Суми, 24-26 жовтня 2022 року)

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

Суми
2022

УДК 53:004(08)
М 34

Рекомендовано вченою радою Інституту прикладної фізики НАН України
(протокол №9 від 16.11.2022 р.)

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

Рецензенти:
Холодов Р. І. – доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України, в.о. директора Інституту прикладної фізики НАН України.
Салтикова А. І. – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри математики, фізики та методик їх навчання СумДПУ імені А. С. Макаренка.

М 34 Сучасні проблеми експериментальної, теоретичної фізики та методики навчання фізики: матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю, м. Суми, 24-26 жовтня 2022 р. / за ред. С. О. Лебединського – Суми: ІПФ НАН України, 2022. – 87 с.

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

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

Матеріали подаються в авторській редакції.

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

© Лебединський С. О., 2022
© ІПФ НАН України, 2022

ЗМІСТ

Алексенко О. В. ЧИСЛОВИЙ РОЗВ'ЯЗОК РІВНЯННЯ ЛАНЖЕВЕНА З АДИТИВНИМ ШУМОМ 7

Батурін В. А., Карпенко О. Ю, Єрьомін С. О., Роєнко О. Ю., Нагорний А. Г. ВПЛИВ ТОНКОПЛІВКОВИХ ПОКРИТТІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ПРОБОЇВ МІДНИХ ЗРАЗКІВ 9

Батурін В. А., Литвинов П. О., Роєнко О. Ю. КОМПАКТНЕ ДЖЕРЕЛО ІОНІВ МЕТАЛІВ ДЛЯ ІМПЛАНТЕРНОЇ ТЕХНІКИ 11

Білогородський Ю. С., Шірінян А. С. СТАБІЛЬНІСТЬ ВИСОКОДИСПЕРСНИХ КЕРАМІЧНИХ І МЕТАЛЕВИХ СПОЛУК ПІД РАДІАЦІЙНИМ ОПРОМІНЕННЯМ ... 13

Возний В. І., Пономарьов О. Г., Москаленко В. Б., Садовий С. О. ІОННЕ ДЖЕРЕЛО З ЕЛЕКТРОННИМ УДАРОМ ДЛЯ КОМПАКТНОГО МІКРОЗОНДА **15**

Ворона М. І., Лебедь О. А. ЧАС ЖИТТЯ ПОЗИТРОНІВ В ПОТЕНЦІАЛЬНІЙ ЯМІ В МОДИФІКОВАНІЙ МОДЕЛІ ТАО-ЕЛДРУПА 16

Ворошило О. І., Недорешта В. М. РОЗРАХУНОК ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНОГО ДОДАНКУ В ЙМОВІРНОСТІ КЕД ПРОЦЕСІВ 2-ГО ПОРЯДКУ З ФОТОННИМ ПРОМІЖНИМ СТАНОМ В ПОЛІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ 17

Данильченко С. М., Запорожець В. К., Новіков С. В., Чіванов В. Д. ВИЗНАЧЕННЯ ВОДНЮ В МЕТАЛАХ МЕТОДОМ ТЕРМІЧНОЇ ЕКСТРАКЦІЇ В ІНЕРТНОМУ ГАЗОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ **21**

Дяченко М. М., Новак О. П., Холодов Р. І. ПОГЛИНАННЯ ФОТОНА ЧЕРЕЗ НАРОДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЇ ПАРИ В НАДКРИТИЧНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ 22

Жуков А. О. ЕКСПЕРИМЕНТ ЯК ОСНОВА НАВЧАННЯ ФІЗИКИ 24

Ігнатьєв І. Г., Москаленко В. Б. ПРИСКОРЮВАЧ ДЛЯ ПРОТОННО - ПРОМЕНЕВОЇ ЛІТОГРАФІЇ 25

Каленик М. В., Борисенко А. М. ПРОБЛЕМИ ВИКЛАДАННЯ ФІЗИКИ В ШКОЛІ В УМОВАХ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ 26

Каленик М. В., Цирулик Є. О. РОЗВИТОК ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ЗДІБНОСТЕЙ УЧНІВ ОСНОВНОЇ ШКОЛИ ПРИ НАВЧАННІ ФІЗИКИ 29

Каленик М. В., Шатова О. Д. MIND-MAP ТЕХНОЛОГІЯ ЯК ОДНА З ФОРМ РОЗВИВАЮЧОГО НАВЧАННЯ 32

Коломієць В. М., Шкурат О. І., Кравченко С. М., Кононенко І. М. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ВНУТРІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ СТВОЛІВ АРТИЛЕРІЙСЬКОГО ОЗБРОЄННЯ 34

Колінько І. С., Гончаров О. А., Левчинський А. В. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕССІВ УТВОРЕННЯ ТА ФОРМУВАННЯ ПЛІВОК ТУГОПЛАВКИХ СПОЛУК 35

Котовський Г. В. ПРО ВИКОРИСТАННЯ BYOD-ПІДХОДУ В НАВЧАННІ ФІЗИКИ 37

Крикля С. В. ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДУ ІОНОЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ НА БАЗІ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПРИСКОРЮВАЧА 38

Кузьменко О. С. СИМЕТРІЯ ТА АСИМЕТРІЯ ЯК ГЕНЕРУЮЧІ НАСКРІЗНІ ПОНЯТТЯ: АСПЕКТ STEM В УМОВАХ ТРАНСДИСЦИПЛІНАРНОСТІ 39

Кулик О. М. ВПЛИВ ХІМІЧНИХ МОДИФІКАТОРІВ НА АНАЛІТИЧНИЙ ТЕРМІН ДІЇ ГРАФІТОВИХ ПЕЧЕЙ АТОМНО-АБСОРБЦІЙНОГО СПЕКТРОМЕТРА 40

Кульментьєв О. І. МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ НАНОКЛАСТЕРІВ ДЛЯ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У РАМКАХ БАГАТОРІВНЕВОГО МОДЕЛЮВАННЯ 42

Лебединська Ю. С., Лебединський С. О., Холодов Р. І. ПОЛЬОВА ЕЛЕКТРОННА ЕМІСЯ З «РЕАЛЬНОЇ» ПОВЕРХНІ МЕТАЛУ 43

Лобас Д. І. МІСЦЕ ФІЗИКИ В СИСТЕМІ ЗАГАЛЬНООСВІТНІХ ПРЕДМЕТІВ 44

Марченко О. А. ЗАСТОСУВАННЯ ТВОРЧОЇ СКЛАДОВОЇ НА УРОКАХ ФІЗИКИ ДЛЯ РОЗВИТКУ ПРЕДМЕТНИХ ТА КЛЮЧОВИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ УЧНІВ 45

Мей Ліхун ВИКОРИСТАННЯ НАВЧАЛЬНИХ ВІДЕО ІСТОРИЧНОГО ЗМІСТУ НА УРОКАХ ФІЗИКИ 46

Моргун О. І., Діденко Р. П., Мусієнко О. С., Фам Д. К. РОЗРОБКА СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ФІКСАТОРА ВЕЛИКОГОМІЛКОВОЇ КІСТКИ 48

Мусієнко І. І., ГУСТИНА СТРУМУ ПОЛЬОВОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ ЕМІСІЇ З ПОВЕРХНІ МЕТАЛУ З ВРАХУВАННЯМ НАЯВНОСТІ НАНОСКОПІЧНИХ ВІСТРЬ 50

Недорешта В. М., Ворошило О. І. РЕЗОНАНС ПРЯМОЇ АМПЛІТУДИ ЕФЕКТУ КОМПТОНА ДЛЯ УЛЬТРАРЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕНЕРГІЙ ЕЛЕКТРОНІВ У СИЛЬНОМУ ЛАЗЕРНОМУ ПОЛІ..... 52

Новак О. П., Дяченко М. М., Холодов Р. І. ЗНИЖЕННЯ САМОПОЛЯРИЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОНІВ В ПРОЦЕСІ НЕЛІНІЙНОГО СИНХРОТРОННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ..... 54

Овчаренко А. Ю., Лебедь О. А. ФОРМУВАННЯ ФАЗОКОНТРАСТНОГО ЗОБРАЖЕННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ТЕСТОВИХ ОБ'ЄКТІВ..... 55

Острик В. І. РОЗКРИТТЯ ТРІЩИНИ НА МЕЖІ ПРУЖНОЇ ПІВПЛОЩИНИ ТА ЖОРСТКОЇ СТІНКИ..... 57

Пасько О. О., Лебединська Ю. С. ВІРТУАЛЬНИЙ ДЕМНСТРАЦІЙНИЙ ФІЗИЧНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ..... 59

Пекельний Д. О., Мусієнко О. С., Фам Д. К. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛІВ РОЗПОДІЛУ НАПРУЖЕНЬ ТА ДЕФОРМАЦІЇ МЕТОДОМ ФОТОПРУЖНОСТІ В ОРТОПЕДИЧНИХ ІМПЛАНТАТАХ..... 60

Поліщук А. В., Павлюк М. О. ЧИСЕЛЬНА ОЦІНКА КОНТРАСТНОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ В МЕТОДІ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ФАЗОВОГО КОНТРАСТУ НА ОСНОВІ ВІЛЬНОГО ПОШИРЕННЯ..... 62

Пономарьов О. Г., Колінько С. В., Ребров В. А., Положій Г. Є., Салівон В. Ф. СИСТЕМА СКИДАННЯ ПУЧКА ЗІ ЗРАЗКА ДЛЯ КАНАЛУ ПРОТОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ЛІТОГРАФІЇ АНАЛІТИЧНОГО ПРИСКОРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ІПФ НАН УКРАЇНИ **64**

Пономарьов О. Г., Колінько С. В., Положій Г. Є. ФОРМУВАННЯ ПУЧКА В УСТАНОВКАХ ПРОТОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ЛІТОГРАФІЇ ВИСОКОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ 65

Рогульський Ю. В. РОЗПОДІЛ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ В ОРГАНАХ РОСЛИН ВНАСЛІДОК ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ..... 66

Сайко М. О., Ігнатенко С. М., Марійчук О. В. ПОТОЧНИЙ СТАН РОЗРОБКИ УНІВЕРСАЛЬНОЇ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ І ЗБОРУ ДАНИХ НАУКОВО-НАВЧАЛЬНОЇ І ТЕХНОЛОГІЧНОЇ АПАРАТУРИ..... 67

Салтикова А. І., Голишевська Д. С. ЕКОЛОГІЧНИЙ АСПЕКТ ШКІЛЬНОГО КУРСУ ФІЗИКИ..... 69

Салтикова А. І., Алтухов А. О. ФІЗИЧНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ В УМОВАХ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ 70

Салтиков Д. І., Маценко М. В. ЗНАЧЕННЯ ТА РОЛЬ ІСТОРИЗМУ В НАВЧАННІ ФІЗИКИ 70

Скороход Р. В., Коропов О. В. ВПЛИВ ЕНЕРГІЙ МІГРАЦІЙ ВАКАНСІЙ КОМПОНЕНТІВ СПЛАВУ НА ЕФЕКТИ РАДІАЦІЙНО-ІНДУКОВАНОЇ СЕГРЕГАЦІЇ В АУСТЕНІТНИХ СПЛАВАХ Fe-Cr-Ni 71

Тимошенко О. В., Бабак А. М., Кравченко В. В., Новосад А. А. МОДЕРНІЗАЦІЯ ВУЗЛА КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОГО МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ В КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛАХ **73**

Тимошенко О. В., Мусієнко О. С., Нєхороших М. В. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ МОДЕЛЕЙ МАКСВЕЛЛА ТА КЕЛЬВІНА-ФОЙГТА 75

Фам Д. К., Мусієнко О. С., Демешко Я. В. ВИЗНАЧЕННЯ ЖОРСТКОСТІ АПАРАТУ ІЛІЗАРОВА ПРИ РІЗНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ ЗА ДОМОПОГОЮ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ 76

Фам Д. К., Мусієнко О. С., Ребристий Д. І. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ БІОМЕХАНІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЖОРСТКОСТІ МОДІФІКОВАНИХ ФІКСАТОРІВ 78

Федів В. І., Олар О. І., Бірюкова Т. В. ОСОБЛИВОСТІ ВИКЛАДАННЯ ПРИРОДНИЧИХ ДИСЦИПЛІН ДЛЯ ЗДОБУВАЧІВ МЕДИЧНОЇ ОСВІТИ 80

Федів В. І., Олар О. І., Бірюкова Т. В. ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОБЛЕМНО-ОРІЄНТОВАНОГО НАВЧАННЯ ПРИ ПІДГОТОВЦІ СТУДЕНТІВ-МЕДИКІВ 81

Хелемеля О. В., Лебединський С. О., Холодов Р. І. МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ АЛГОРИТМІВ PIC В ЗАДАЧАХ ПОЛЬОВОЇ ЕМІСІЇ 82

Щербак М. О. ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ОРГАНІЗАЦІЇ ТА ПРОВЕДЕННЯ УРОКІВ З ФІЗИКИ В ОСНОВНІЙ ШКОЛІ 83

Profatilova I. EFFECT OF PULSE WIDTH ON THE BREAKDOWN RATE AT PULSED DC SYSTEM 84

Алексенко О. В.
кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник,
Інститут прикладної фізики НАН України,
м. Суми, Україна
ovalexenko@gmail.com

ЧИСЛОВИЙ РОЗВ'ЯЗОК РІВНЯННЯ ЛАНЖЕВЕНА З АДИТИВНИМ ШУМОМ

Поведінка багатьох реальних систем схильна до флуктуацій, а тому не описується виключно детермінованими законами. При цьому рівняння, що визначають властивості системи, стають рівняннями для випадкових змінних – стохастичними рівняннями [1]. В даній роботі для опису стохастичних процесів розглянуто рівняння Ланжевена, яке моделює рух частинки в зовнішньому потенціалі під дією броунівських та аномальних шумів. В найпростішому одновимірному випадку з адитивними шумами рівняння Ланжевена має вигляд:

$$x' = F(x,t) + \xi(t), \tag{1}$$

де $F(x,t)$ – детермінована сила, $\xi(t)$ – випадкова сила (шум).

Метою роботи є комп′ютерне моделювання рівняння Ланжевена (1) з використанням технології паралельних обчислень CUDA. Схема кінцевих різниць для виразу (1) набуває вигляду:

$$x_{k+1} = x_k + F(x_k, t_k)\cdot\Delta t + \sqrt{\Delta t}\ \cdot Z_k, \tag{2}$$

$$x_{k+1} = x_k + F(x_k, t_k)\cdot\Delta t + (\Delta t)^{\frac{1}{\alpha}}\cdot Z_k. \tag{3}$$

В формулі (2) величина Z_k – це випадкове число, яке розподілено за нормальним законом, а в формулі (3) – за законом Леві. При цьому коефіцієнт α лежить в інтервалі (0,2). Отримано наступні результати.

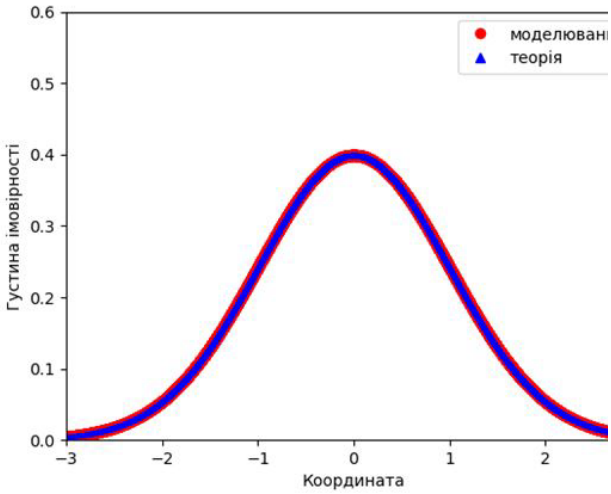


Рис 1. Густина імовірності для нормального розподілу і квадратичного потенціалу

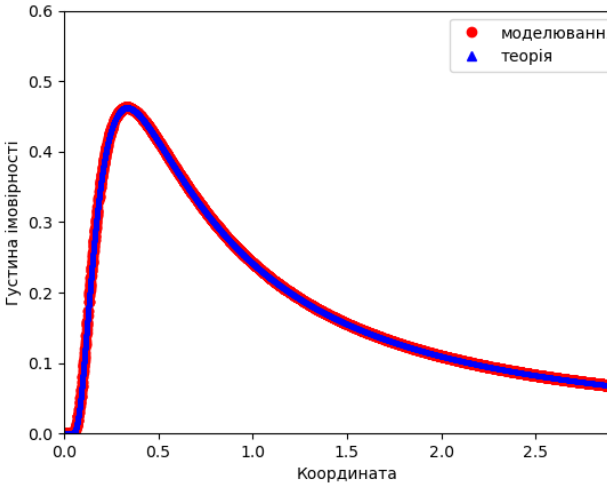


Рис 2. Густина імовірності для розподілу Леві і квадратичного потенціалу

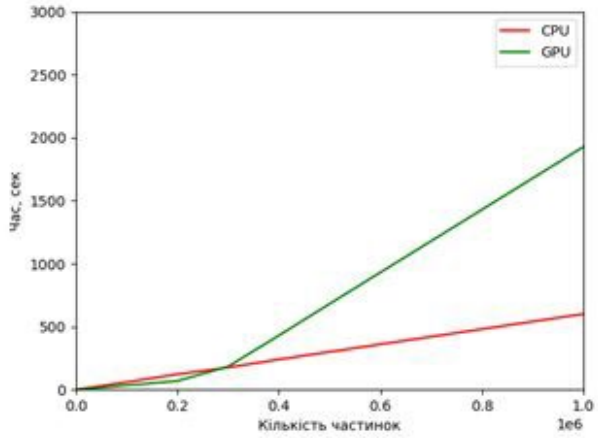


Рис 3. Порівняння швидкості розрахунку для розподілу Леві, $\Delta t = 0{,}1$

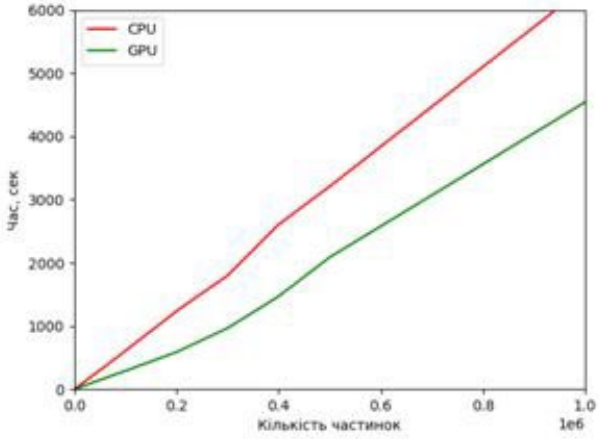


Рис 4. Порівняння швидкості розрахунку для розподілу Леві, $\Delta t = 0{,}01$

На рис. 1 представлено густину імовірності положення частинки, рух якої описується рівнянням Ланжевена (1) з броунівським шумом та лінійною силою. Тут червоним кольором зображена залежність, що обчислена на основі числового розв′язку рівняння (2), а синім кольором залежність, що розрахована за аналітичною формулою. На рис. 2 представлено порівняння результатів моделювання з відомою аналітичною залежністю для рівняння Ланжевена (1) з аномальним шумом та лінійною силою.

Порівняння швидкості розрахунку на CPU і GPU для рівняння (3) показано на рис. 3 і рис. 4. У нашому випадку при $\Delta t = 0{,}1$ центральний процесор обчислює швидше. Однак при $\Delta t = 0{,}01$ (менший шаг відповідає більшій кількості ітерацій) навантаження на центральний процесор зростає і він починає програвати у швидкості рахунку відеокарті. Якщо складність обчислень зростає, то виграш розрахунку на GPU стає ще очевиднішим.

Висновки. Розроблено програмний код із використанням технології паралельних обчислень для розв′язку широкого класу стохастичних диференціальних рівнянь. Розв′язано окремий випадок такого рівняння та проведено порівняння з відомим результатом. Проведено дослідження продуктивності розрахунків на GPU (з використанням паралельних обчислень) та CPU (без паралельних обчислень) та показано ефективність застосованого методу паралельних обчислень. Напрацьований матеріал буде застосовано для вирішення задач радіаційного матеріалознавства.

Список використаних джерел

1. William T. Coffey, Yuri P. Kalmykov, John T. Waldron. The Langevin Equation. – World Scientific, 2004. 678 p.

Батурін В. А.
кандидат фізико-математичних наук, завідувач лабораторії
Карпенко О. Ю.
молодший науковий співробітник
Єрьомін С.О.
кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник
Роєнко О. Ю.
молодший науковий співробітник
Нагорний А.Г.
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Інститут прикладної фізики НАН України,
м. Суми, Україна
ayk@ukr.net

ВПЛИВ ТОНКОПЛІВКОВИХ ПОКРИТТІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ПРОБОЇВ МІДНИХ ЗРАЗКІВ

В останні роки актуальними є питання дослідження вакуумних електричних розрядів, що є надто важливою проблемою для розробки прискорювачів частинок в лінійних колайдерах ТєВ енергій, які є найбільш перспективними для досліджень з фізики високих енергій [1]

Для лінійного колайдера фінальна енергія зіткнення частинок залежить від його довжини і прискорюючого градієнта. Однак високі прискорюючі градієнти призводять до виникнення електричних розрядів на поверхні прискорюючих структур. Тому необхідно досліджувати різні методи забезпечення стійкості прискорюючих структур до високовольтного високо градієнтного пробою.

Для досліджень електричних пробоїв та підвищення стійкості конструкційних матеріалів прискорюючих структур до високо вакуумних пробоїв у ЦЕРНі та ІПФ НАН України ведуться спільні роботи та створені спеціальні стенди. В ІПФ НАН України для підвищення стійкості до високовольтних пробоїв запропоновано проводити іонно-променеву та плазмову модифікацію елементів прискорюючих структур. У попередніх роботах [2,3] ми експериментально показали можливість поліпшення пробивних характеристик мідних зразків з тонкими плівками деяких металів та нітриду титану. У цій роботі проводиться вивчення стійкості до пробоїв мідних зразків, модифікованих плівками нітридів тугоплавких металів, зокрема нітриду молібдену та оксиду цинку по відношенню до зразків із чистої міді. Плівки оксидів та нітридів одержували методом високочастотного магнетронного розпилювання.

У дослідах використовувалась установка, що має двоелектродну структуру, з так званою конфігурацією «площина-вістря» (рис.1) [4].

Параметр	Значення
Тиск в камері	5×10^{-9} mbar
Відстань анод-катод	10 ÷ 100 um
Напруга анод-катод	10 ÷ 100 kV
Струм польової емісії	≥ 1 nA

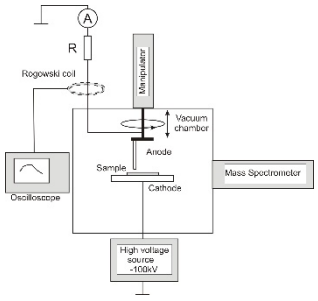


Рис. 1. Схема експериментального стенду та його параметри

Експериментально досліджувались значення величин напруги: при якій виникає перед пробійний струм; при якій починаються мікро-пробої; та напруга остаточного пробою. Додатково знімалася залежність перед пробійного струму від напруги. Усі зрази були поділені на дві частини, одна з якої піддавалась модифікації поверхні, а інша ні. Значення вищезгаданих параметрів визначалися на кожній частині зразка у багатьох точках, а потім усереднювалися для кожної з частин зразка.

Експериментально показано, що текстура плівкового покриття по різному впливає на стійкість зразків до пробоїв в залежності від типу покриття.

Показано, що покриття зразків міді плівками Mo_2N можуть підвищити їх стійкість до пробоїв, в порівнянні з чистою міддю (див.рис.2) та значно зменшити передпробійні струми, але цей ефект залежить від ступеня текстури плівок, який в свою чергу залежить від умов їхнього отримання.

Зразки з достатньо високим ступенем текстури, який визначається інтенсивністю дифракційного піку, мали кращу стійкість до високовольтних пробоїв порівняно із зразками, на яких спостерігалася втрата текстури та утворення роз-орієнтованого структурного стану.

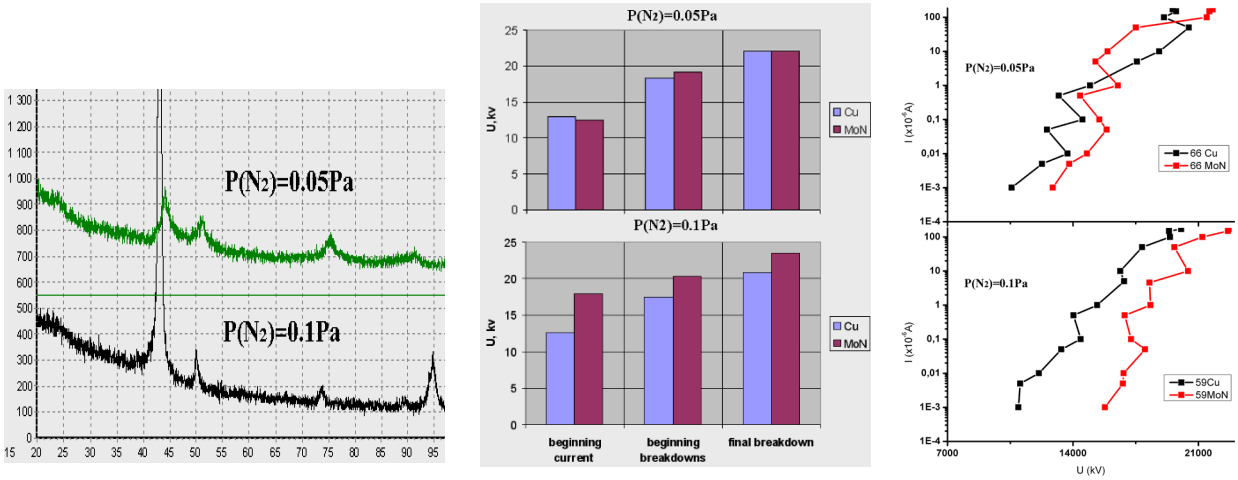


Рис. 2. Дифракційні спектри Mo_2N плівок, які відповідають зразкам з різною стійкістю до пробоїв та результати вимірювань мідних зразків з плівками Mo_2N на стійкість до пробоїв

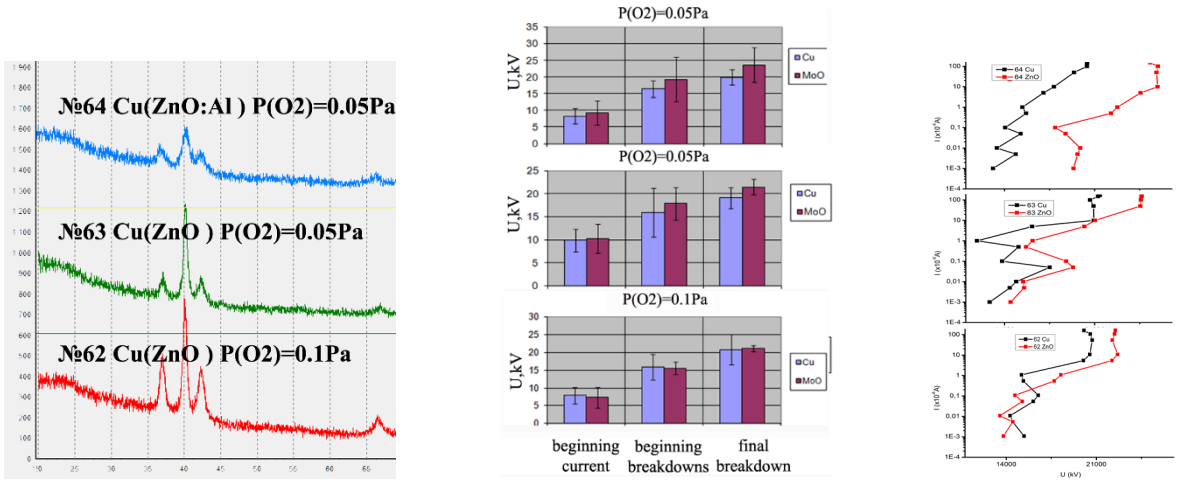


Рис3. Дифракційні спектри плівок ZnO та їх стійкість до пробоїв

Плівки оксиду цинку (діелектричні) на зразках з міді були отримані шляхом розпилення Zn мішені при парціальних тисках кисню 0.1 Ра. та 0.05 Ра. Також, додатково, були отримані плівки оксиду цинку леговані алюмінієм (провідник) в процесі напилення. З рисунка видно, що ступінь текстурування зразків помітно не впливає на характеристики

пробою і всі зразки з нанесеними плівками ZnO мають кращі характеристики параметрів пробою майже на 20%. Легування плівок алюмінієм, не тільки зробило їх провідниками, але й призвело до зменшення перед пробійних струмів на зразках з цими плівками, при цьому ступінь текстурування таких плівок зменшився.

Показано, що покриття міді тонкими плівками із нітридів тугоплавких металів, наприклад Mo_2N, а також деякі оксидні покриття з високим значенням роботи виходу електрона (наприклад ZnO) можуть підвищувати стійкість до високо вакуумних пробоїв на 20 %, в порівнянні із без кисневою міддю.

Список використаних джерел

1. THE COMPACT LINEAR COLLIDER (CLIC) PROJECT IMPLEMENTATION PLAN https://cds.cern.ch/record/2652600/files/CLIC_PIP_20190213.pdf
2. V.A. Baturin, A. Yu. Karpenko, V. E. Storizhko, V.A. Shutko// ВАНТ. 2018. № 4. С. 297-301.
3. V. A. Baturin, A. Yu. Karpenko, S. A. Yeryomin. // ВАНТ 2019. №6 (124) с. 23-26.
4. V. A. Baturin, O. Yu. Karpenko, Ia.V. Profatilova, S. O. Pustovoitov, V. I. Miroshnichenko // ВАНТ, 2015, №4 (98), с. 294-297.

Батурін В. А.
кандидат фізико-математичних наук, завідувач лабораторії
Литвинов П. О.
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Роєнко О. Ю.
молодший науковий співробітник
Інститут прикладної фізики НАН України,
м. Суми,
olegroyenko1991@gmail.com

КОМПАКТНЕ ДЖЕРЕЛО ІОНІВ МЕТАЛІВ ДЛЯ ІМПЛАНТЕРНОЇ ТЕХНІКИ

Створення компактного та простого по конструкції і в експлуатації джерела іонів металів розпилювального типу стало актуальною задачею для виконання робіт на іонному імплантері ІПФ НАН Україні. Існуюче в лабораторії інтенсивне джерело іонів металів, здатне генерувати пучок струму в 1-1,5 mA, відрізняється складною конструкцією, системою живлення та охолодження [1]. Тим часом, для деяких операцій достатньо струму в десятки мікроампер. Розроблене нове джерело в теперішній модифікації генерує струм 10-50 μA, в залежності від режимів роботи та типу іонів, чого достатньо для оперативного виконання експериментів на імплантері з невеликими дозами опромінення.

Конструкція, принцип роботи іонного джерела. Для технологічного процесу іонної імплантації важливо мати іонний інжектор з стабільно працюючим надійним джерелом, здатним поставити в приймальну камеру пучок іонів величиною струму декілька мікроампер з енергією 20 – 150 keV. Перед проведенням конструювання представленого в роботі іонного джерела були виконані модельні розрахунки окремих елементів джерела, зокрема конфігурації магнітного поля. Також підібрано найбільш підходящий тип магніту, визначені розміри джерела з урахуванням можливості використання існуючого на імплантері електроживлення.

Побудова нового джерела ґрунтувалась на механізмі іонного розпилення [2] та формуванні плазмового емітера, що містить іони металу, з використанням механізму тліючого розряду Пеннінга. Осциляція електронів в ньому дозволяє використовувати низький тиск у розрядній камері.

Моделювання магнітного поля джерела іонів виконувалося в програмі “TRUCK”. Магнітне поле у проміжку катод-антикатод регулювалося в діапазоні 0,1 ÷ 0,2 Т.

Моделювання показало, що при використанні постійного магніту NdFeB (кільцевої форми, розміром 100х70х20 мм) напруженість магнітного поля всередині порожнистого катоду 1, аноду 2 та антикатоду 3 досягає величини B = 0,16 ÷ 0,2 Т, що є оптимальним для створюваного джерела іонів.

Конструкція пропонованого джерела схематично показана на рисунку 1.

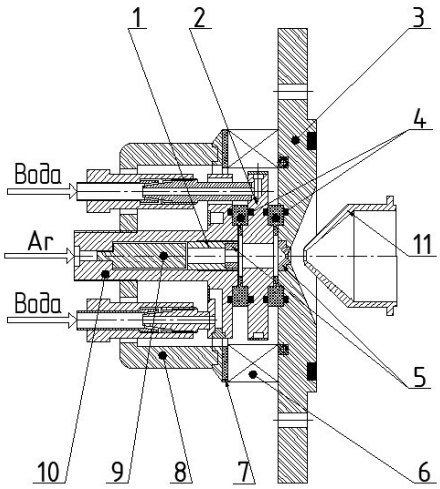


Рис. 1. **Конструкція джерела іонів металу**: 1 – порожнистий катод; 2 – анод; 3 – антикатод; 4,7 – ізолятори; 5 – розпилювальні вставки; 6 – NdFeB магніт; 8 – корпус; 9 – феромагнітна вставка; 10 – катодний вузол; 11 - екстрагуючий електрод

Газорозрядна камера джерела складається із порожнистого катоду 1, аноду 2, антикатоду 3 та корпусу 8, які утворюють пеннінгівську розрядну комірку. Однорідне магнітне поле в газорозрядній камері створюється NdFeB магнітом 6 та системою магнітопроводів 3, 8, 9. Газ (Ar), для підалу плазми та підтримки горіння розряду, подається в систему зі сторони катоду 1 розрядної камери. Газ в розряд надходить через вузьку (0,5 мм) кільцеву щілину в периферійній області катодного вузла 10. Катодний вузол 10 та анод 2 іонного джерела охолоджуються водою.

При подачі напруги на електроди джерела між катодом 1, анодом 2 і антикатодом 3 загоряється тліючий розряд з напругою ~ 400 V і струмом в межах 100 ÷ 400 mA. Іони аргону бомбардують розпилювальні вставки в катоді та антикатоді створюючи в емісійній області газорозрядної камери робоче середовище із розпилених атомів і буферного газу Ar. Швидкі осцилюючі електрони, які в основному зосереджені на осі розряду, проводять іонізацію робочого середовища. Іони, що потрапили в зону дії електричного поля, екстрагуються в область іонно-оптичного тракту джерела і формуються в іонний пучок.

Результати експериментальних досліджень. Проведено відпрацювання режимів роботи нового джерела іонів металів на існуючому в ІПФ НАН України іонному імплантері. Експерименти проводилися на вставках із Al, хоча джерело може працювати і з будь якими другими елементами: Be, Fe, Zr, Cu, C, Ar, та іншими.

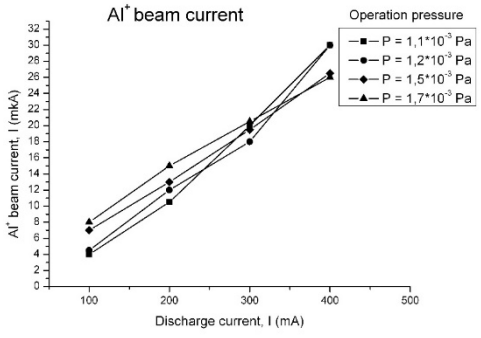


Рис. 2. – Залежність струму іонів Al+ від розрядного струму при різних значеннях тиску

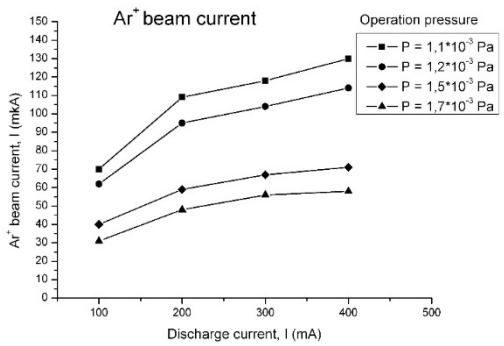


Рис. 3. – Залежність струму іонів Ar+ від розрядного струму при різних значеннях тиску

Іонний пучок, екстрагований із іонного джерела після проходження іонно-оптичної системі імплантера, сепарувався по масах у магнітному мас-сепараторі, формувався одиночною електростатичною лінзою, прискорювався у трубці прискорення і потрапляв в циліндр Фарадея приймальної камери. Вакуум в приймальній камері підтримувався на рівні $1 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Були зняті залежності струму іонів Al+, Ar+ від розрядного струму та тиску плазмоутворюючого газу, що можна побачити на наступних графіках:

Висновки:

- Розроблено надійне, недороге та універсальне джерело металевих іонів на основі розпилювального пеннінгівского розряду, яке дозволяє отримувати широкий спектр іонів різних металів та газів;
- Розроблене джерело має високу стабільність іонного струму з часом (час роботи на одному комплекті розпилюваних вставок t > 16 год.).

Важливо відмітити, що джерело просте в обслуговуванні і універсальне в тому, що може генерувати іони з будь-якого газу та будь-якого металу без використання високотемпературної печі для його випаровування.

Список використаних джерел

1. П.А. Литвинов, В.А. Батурин С.А.Пустовойтов /Разработка и исследование источника ионов металлов для технологических ускорительных установок // Журнал технической физики, 2014, том 84, выпуск 4, с. 126-131.
2. Плешивцев Н.В. Катодное распыление. – М.: Атомиздат,1968, - 347 с.

Білогородський Ю.С.
молодший науковий співробітник
Шірінян А.С.
доктор фізико-математичних наук, завідувач лабораторії
Інститут прикладної фізики НАН України,
м. Суми, Україна
urabelogorodsky@ukr.net

СТАБІЛЬНІСТЬ ВИСОКОДИСПЕРСНИХ КЕРАМІЧНИХ І МЕТАЛЕВИХ СПОЛУК ПІД РАДІАЦІЙНИМ ОПРОМІНЕННЯМ

Сьогодні актуальним є завдання виготовлення високодисперсних композиційних матеріалів (ВДКМ) з керованими складом, структурою і експлуатаційними характеристиками для захисту військових, населення та об’єктів критичної інфраструктури населення в умовах як механічного, так і радіаційного ураження. Вирішення такого завдання стає можливим за умови проведення експериментальних і теоретичних досліджень з визначення режимів виготовлення та опису фізико-хімічних характеристик ВДКМ. Серед відповідних матеріалів особливе місце займають сполуки на основі кераміки (перш за все, карбіду кремнію SiC для атомних реакторів 4-го покоління) та металів, що можуть бути використані в умовах високих температур та радіаційного опромінення.

Вплив опромінення зазвичай полягає у появі мігруючих вакансій та інших точкових дефектів [1, с.921; 2, с.14611], фазових перетворень типу аморфізації чи поліморфного перетворення [3, с. 60; 4]. Одним із способів придушення мігруючих точкових дефектів в матеріалі полягає у використанні поверхні типу межі зерна, міжфазних інтерфейсів. Зменшення дисперсності ВДКМ (розміру частинок до нанометрового масштабу або розміру зерен в полізерністих матеріалах) суттєво збільшує частку поверхні (кількість стоків дефектів), тому можна очікувати, що радіаціна стійкість ВДКМ може бути покращена за рахунок розмірних ефектів [5, p. 50].

Метою дослідження є визначення впливу дисперсності матеріалу та вакансійного пересичення на фазову стійкість модельних сполук на основі SiC (модель 2) і Fe (модель 1) при радіаційному опроміненні.

Методологія. Нами запропоновано термодинамічний підхід, який базується на розрахунку вільної енергії Гіббса ВДКМ для різних фазових станів з врахуванням дефектів і опромінення. Ми аналізуємо зміни фази в околицях температури перетворення залежно від ступеню вакансійного пересичення, розміру частинок або зерен ВДКМ, температури, та інших параметрів. Орієнтовні для моделей параметри опромінення взяті як 4 MeV ions з флюенсом $1\times10^{15} – 2\times10^{16}$ ions/cm^2, швидкість генерації дефектів 4×10^{-6} dpa/s, концентрація вакансій залежить від розміру частинок і змінюється в діапазоні 0.1–15%.

Модель 1 – Fe. Ансамбль сферичних частинок заліза в інертному середовищі обрано у якості модельного ВДКМ і досліджено фазовий перехід α-Fe→γ-Fe. Ми пояснюємо радіаційну стійкість Fe як стійкість до фазового переходу.

Отримано, що при температурах до 850K для малих α-Fe частинок з діаметром приблизно до 2nm перетворення може відбуватися без значного опромінення. Для частинок α-Fe з розмірами від 3 до 9nm (і температур до 850K) можлива зона існування стійкості до перетворення при іонізуючому опроміненні. Це означає, що дисперсність стабілізує ВДКМ в умовах опромінення. Отримано для великих частинок Fe, що внесок енергії від вакансійних дефектів домінує у сумарній енергії частинки і тому у наноматеріалах з великим розміром частинок не можна очікувати значно підвищеної радіаційної стійкості порівняно з об'ємним зразком.

Модель 2 – SiC. Досліджено стабільність полізернистого кубічного карбіду кремнію 3C-SiC стехіометричного складу 50%-50% (β-SiC з алмазоподібною решіткою сфалериту з параметром a=0.4360 нм) та можливість аморфізації такого ВДКМ під опроміненням. Основні фізико-механічні характеристики β-SiC зумовлені міжатомним сильним ковалентним зв'язком, що призводить до високої температури плавлення, твердості та хімічної тривкості: атоми мають різну спорідненість до електрону і оточені чотирма атомами іншого сорту. В рамках моделі 2 ми пояснюємо радіаційну стабільність 3C-SiC як стійкість до аморфізації з точки зору конкуруючих ефектів: (i) з одного боку, менший розмір зерна знижує накопичення вакансій усередині зерна і вільну енергію, (ii) з іншого боку менший розмір зерна збільшує вільну енергію через зростання частки площі між зернами (міжфазної поверхні).

Отримано, що при швидкості генерації дефектів 4×10^{-6} dpa/s для інтервалу температур 600-1500K зона радіаційної стабільності (відсутність аморфізації) 3C-SiC відповідає розмірам зерен меншим за 25-30 nm.

Обґрунтовано, що аморфізація нанозернистого SiC не може відбуватися лише за рахунок великої частки міжфазної поверхні, але можлива під дією опромінення при незмінних інших параметрах.

Роботу виконано в рамках НДР і напряму досліджень лабораторії композитних матеріалів атомно-водневої енергетики ІПФ НАНУ.

Список використаних джерел

1. Shen T.D. Radiation tolerance in a nanostructure: Is smaller better? Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (2008) B 266. P. 921–925.

2. Hohl J. et al. Thermodynamic stabilization of nanocrystalline aluminium. Mater Sci (2021) 56:14611–14623.

3. Неклюдов И.М., Черняева Т.П. Радиационная аморфизация материалов. Обзор (I993). Харьков: ХФТІ, 76 с.

4. Levo E. et al. Radiation stability of nanocrystalline single-phase multicomponent alloys (2019) DOI: 10.1557/jmr.2019.19

5. Shirinyan A.S., Bilogorodskyy Y.S., Krit O.M. Effect of vacancy swelling on phase changes in nanocomposites under irradiation. Book of Abstracts of VIII International Samsonov conference "Materials science of refractory compounds" (MSRC-2022) Kyiv. 111p, P.50.

Возний В.І.,
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Пономарьов О.Г.,
доктор фізико-математичних наук, професор
Москаленко В.Б.,
головний інженер КУ
Садовий С.О.,
молодший науковий співробітник
Інститут прикладної фізики НАН України,
м. Суми, Україна
vozny56@gmail.com

ІОННЕ ДЖЕРЕЛО З ЕЛЕКТРОННИМ УДАРОМ ДЛЯ КОМПАКТНОГО МІКРОЗОНДА

У доповіді наведено результати тестування іонного джерела з електронним ударом. Джерело призначене для роботи в компактному іонному мікрозонді [1]. Іонні джерела з електронним ударом характеризуються дуже малим енергетичним розкидом і широко використовуються у мас-спектрометрії [2, 3]. Дана конструкція джерела була розроблена на підприємстві «Selmi» для малогабаритного мас-спектрометра і виконана за схемою іонного джерела з електронним ударом, запропонованого у роботах [4, 5].

У джерелі потік електронів з катода, що розжарюється, направляється в анодну коробочку. Струм катода – 1,9 А, енергія електронного пучка – до 140 еВ. Робочий газ надходить усередину анодної коробочки, де відбувається ударна іонізація газу електронним пучком. Простір іонізації всередині анодної коробочки є практично безпольовим, що обумовлює низький енергетичний розкид утворюваних іонів. Розкид енергії може бути нижче 0,2 еВ. Іонно-оптична система плоских електродів із прямокутними отворами формує стрічковий іонний пучок. Розмір отвору екстракції пучка– 0,5х4 мм.

У доповіді наведено результати вимірювання параметрів іонного джерела за різних режимів роботи. Характерні параметри джерела: струм пучка іонів водню – до 1 нА, енергія пучка – 4,2 кВ, струм електронної емісії – до 200 мкА, робочий тиск газу – $2 \cdot 10^{-3}$ Па. Потужність –30 Вт, розміри джерела– діаметр 58 мм, довжина 150 мм. Передбачуваний енергетичний розкид близько 1 еВ. Такі параметри іонного джерела роблять його перспективним для застосування в компактному іонному мікрозонді.

Проведено чисельне моделювання поширення іонного та електронного пучків у даному джерелі іонів. Моделювання проводилося з використанням пакетів Comsol і CST Studio як у двовимірному, так і в тривимірному наближеннях.

Список використаних джерел

1. D. Magilin, A. Ponomarev, V. Rebrov, A. Ponomarov, High-voltage scanning ion microscope: Beam optics and design, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 350 (2015), pp. 32-35. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.03.032
2. B. Wolf, *Handbook of Ion Sources*, (by CRC Press, Inc, 1995), pp. 37.
3. В.Т. Черепин, *Ионный микрозондовый анализ*, (Наукова думка, 1992), с. 116.
4. A.O. Nier, A Mass Spectrometer for Isotope and Gas Analysis, *Rev. Sci. Instrum.* **18**, 398 (1947). http://dx.doi.org/10.1063/1.1740961
5. H. Barthels, J. Grosser and H-P. Neitzke, Electron bombardment ion source with small energy spread and high brightness, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **19,** 819 (1986). http://iopscience.iop.org/0022-3735/19/10/012

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

ЧАС ЖИТТЯ ПОЗИТРОНІВ В ПОТЕНЦІАЛЬНІЙ ЯМІ В МОДИФІКОВАНІЙ МОДЕЛІ ТАО-ЕЛДРУПА

Вплив радіаційного випромінювання на конструкційні матеріали ядерних реакторів на сьогоднішній день є одним з найактуальніших питань ядерного матеріалознавства, що пов'язано із необхідністю продовження терміну дії працюючих нині реакторів та реалізації амбітних проєктів по створенню ядерних реакторів нового покоління [1]. Метод спектроскопії часу життя позитронів дає унікальні можливості для дослідження електронної структури опроміненого матеріалу. Час життя позитрона τ і, відповідно, швидкість анігіляції позитрона λ визначається перекриттям густини електрона і позитрона в області локалізації останнього. В загальному випадку швидкість анігіляції позитрона в матеріалі залежить від перерізу анігіляції електрон-позитронної пари та розподілу електронної густини [1-4]. Також вводять кореляційну функцію, яка описує локальні зміни електронної густини. Дефекти характеризуються меншою електронною густиною порівняно з бездефектними областями, тому час життя позитрона в цих областях зростає.

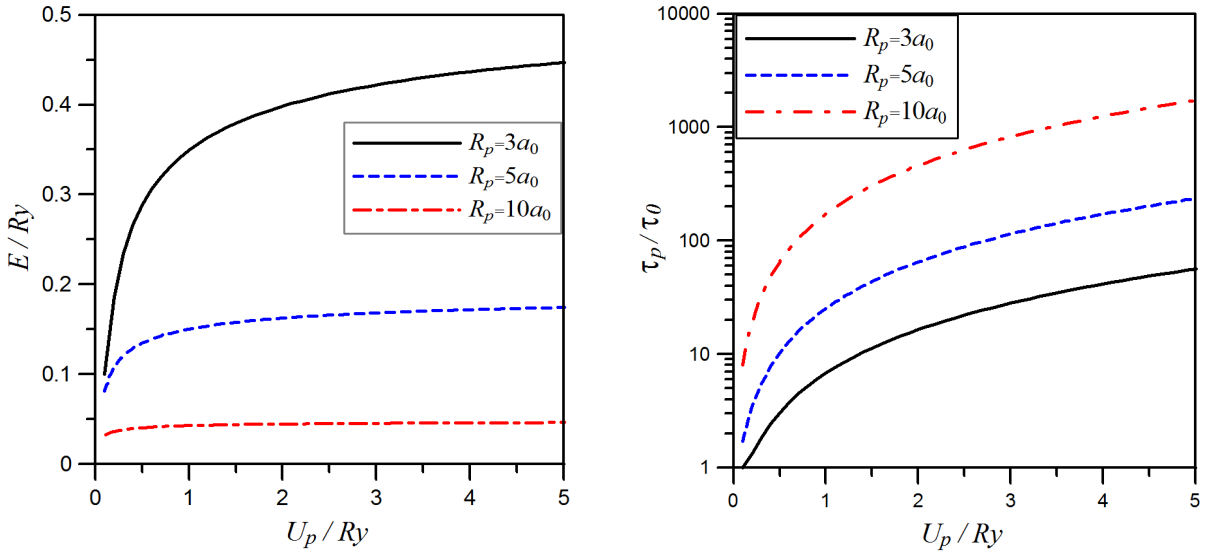
Модель Тао-Елдрупа дозволяє описати анігіляцію позитрона в сферично симетричній потенціальній ямі та забезпечує простий та наглядний зв'язок між розміром ями та часом життя в ній позитронієвих станів [5-6]. В цій моделі взаємодія позитрона із середовищем апроксимується нескінченно глибокою сферично-симетричною потенціальною ямою певної ширини. Крім цього феноменологічно включається прошарок електронної густини всередині ями, який визначає межі перекриття густин і має ту ж густину, що і в основному об'ємі матеріалу. Розв'язок рівняння Шредінгера для моделі Тао-Елдрупа добре відомий, енергія позитронієвого стану приймає дискретні значення.

В представленому дослідженні пропонується розвинути модель Тао-Елдрупа на випадок, коли висота потенціальної ями має скінченну висоту. При цьому не вводиться додатковий шар, а швидкість анігіляції визначається перекриттям позитронної та електронної густини за рахунок тунелювання за межі потенціальної ями в основний матеріал. Такий підхід зводиться до припущень про повну ізотропію сил і сталість потенціальної енергії всередині ями, проте дає важливу інформацію для аналізу спектрів часу життя позитронів в опромінених матеріалах та дані для верифікації кількісних розрахунків для часу життя позитрона методами функціоналу щільності, що досить широко використовується для таких задач.

В модифікованій моделі Тао-Елдрупа отримано умову для визначення енергії позитронієвого стану та аналітичний вираз для його часу життя:

$$\sin(r_p\sqrt{2\varepsilon}) = \pm\sqrt{\varepsilon/u_p}\,, \qquad \tau_P = \tau_0\left\{1 + \frac{r_p\sqrt{2(u_p-\varepsilon)}}{2\sin^2(r_p\sqrt{2\varepsilon})}\left(1 - \frac{\sin(2r_p\sqrt{2\varepsilon})}{2r_p\sqrt{2\varepsilon}}\right)\right\}$$

Тут перший вираз це умову на значення енергії позитронієвих станів $\varepsilon = E/Ry$. Радіус Бора та постійна Рідберга зручно використати як масштаби довжини та енергії відповідно: r_p, u_p – ширина і висота ями, τ_0 – час життя позитрона в основному матеріалі. Другий вираз і описує зміну часу життя позитронієвого стану в сферично-симетричній потенціальній ямі скінченної висоти. Як і слід було очікувати, з урахуванням зв'язку для енергії, відносна зміна часу життя позитрона повністю визначається висотою та шириною ями.



а) б)

Рисунок 1.

На рисунку 1 представлено залежність енергії (а)) та відношення часу життя позитрона (б)) в сферично-симетричній потенціальній ямі скінченної висоти до часу життя позитрона в основному об'ємі матеріалу як функції висоти потенціальної ями при різних значеннях її розмірів. З ростом висоти потенціальної ями значення часу життя досить швидко зростає і в розглянутому діапазоні енергій на два порядки величини може перевищувати час життя позитрона в основному об'ємі матеріалу. Слід зазначити, що врахування тунелювання електронів всередину потенціальної ями зменшить час життя позитрона, проте це предмет для подальших досліджень.

Список використаних джерел

1. Воеводин В.Н.. ВАНТ, 2007, №2, с. 10-22.
2. Графутин И., Прокопьев Е. П., УФН, 2002, 172(1), с. 67–83;
3. Дудник А.Б. и др., ВАНТ, 2013, №2 (84)
4. Puska M.J., Nieminen R.M. *Reviews of Modern* 2. *Physics.* 1994, v. 66, p. 841-897.
5. Tao S.J. Erratum: J. Chem. Phys. 1972, 56, 5499.
6. Lightbody D., Sherwood J.N., Eldrup M. Chem. Phys. Lett. 1980. Vol.70, no.3. P.487–491

Ворошило О.І.,
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Недорешта В.М.,
кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник
Інститут прикладної фізики НАН України,
м. Суми, Україна
alwar1972@gmail.com

РОЗРАХУНОК ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНОГО ДОДАНКУ В ЙМОВІРНОСТІ КЕД ПРОЦЕСІВ 2-ГО ПОРЯДКУ З ФОТОННИМ ПРОМІЖНИМ СТАНОМ В ПОЛІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ

Запропоновано новий метод розрахунку інтерференційного доданку в ймовірностях процесів 2-го порядку з фотонним проміжним станом, які відбуваються в полі плоскої електромагнітної хвилі.

Вступ

Розрахунок ймовірностей процесів 2-го порядку за сталою тонкої структури в полі електромагнітної хвилі кардинально ускладнюється у порівнянні з процесами 1-го порядку. Тому у випадку процесів 2-го порядку для розрахунку ймовірностей використовують числові методи або різні наближення, зокрема, метод еквівалентних фотонів, використання до тризуб-процесу див. [1]. Інші приклади можна знайти в монографії [2].

Важливість отримання явних виразів для ймовірностей процесів 2-го порядку в полі електромагнітної хвилі полягає в тому, що це дозволило б краще розуміти фізику процесу, а також пришвидшити розрахунки.

В подальших дослідженнях зосередемося на лінійній поляризації хвилі, зауваживши, що отримані результати мають більш широкий результат і можуть бути перенесеніна довільну поляризацію хвилі.

Амлітуда процесу

За приклад, процесу 2-го порядку, з фотонним проміжним станом, візьмемо процес розсіювання електрона на електроні. Амплітуду процесу цього процесу в полі плоскої електромагнітної хвилі, після інтегрування за 4-координатами вершин, можна представити у вигляді суми парціальних компонент:

$$S_{fi} = \sum_{l,l'=-\infty}^{\infty} S_{l,l'}, \tag{1}$$

де парціальна амплітуди має вигляд:

$$S_{l,l'} = C\left(\frac{T^{(a)}_{l,l'}}{\kappa_1^2} + \frac{T^{(b)}_{l,l'}}{\kappa_2^2}\right)(2\pi)^4 \delta^{(4)}\left(\widetilde{p}_1 + \widetilde{p}_2 + lk - \widetilde{p}_1^{'} - \widetilde{p}_2^{'}\right), \tag{2}$$

$$T^{(a)}_{l,l'} = B_\mu\left(p_2^{'}, p_2\right)A^\mu\left(p_1^{'}, p_1\right), \quad T^{(b)}_{l,l'} = B_\mu\left(p_1^{'}, p_2\right)A^\mu\left(p_2^{'}, p_1\right), \tag{3}$$

$$A^\mu = \overline{u}_{p_1^{'}} M^{\mu}_{l'}\left(p_1^{'}, p_1\right)u_{p_1}, \quad B_\mu = \overline{u}_{p_2^{'}} M_{\mu,l-l'}\left(p_2^{'}, p_2\right)u_{p_2}, \tag{4}$$

$$M^{\mu}_{l'}(p^{'}, p) = L_{l'}\gamma^\mu + \left(\frac{m^2}{8(kp^{'})(kp)}B_{l'}k^\mu + \frac{m}{2(kp)}D^{\mu}_{l'}\right)\hat{k} - \frac{m}{2(kp)}\hat{D}_{l'}k^\mu -$$

$$-\frac{m}{4}\beta_{-}\hat{D}_{l'}\hat{k}\gamma^\mu, \quad \beta_{\pm} = \frac{1}{(kp^{'})} \pm \frac{1}{(kp)}. \tag{5}$$

У виразі (2) C – нормувальна константа, вирази для $L_{l'}$, $D_{l'}$, $B_{l'}$ через їх громіздкість ми тут не приводимо, їх явний вигляд можна знайти, наприклад, в монографії [2], γ – матриці Дірака, шляпкою над 4-вектором позначені їх згортки з γ – матрицями, u_p – біспінор Дірака вільного електрона, k – хвильовий 4-вектор, $p_{1,2}$ – 4-імпульси початкових електронів, $p_{1,2}^{'}$ – 4-імпульси кінцевих електронів, тильда над імпульсами позначає відповідні квазіімпульси (див. [3]), $\kappa_{1,2}$ – 4-імпульс проміжного фотона (індекс 1 відноситься до 1-ої діаграми, 2 – другої):

$$\kappa_1 = \widetilde{p}_1 + l_1 k - \widetilde{p}_1^{'} = -\widetilde{p}_2 + \widetilde{p}_2^{'} - [l - l_1]k, \tag{6}$$

$$\kappa_2 = \widetilde{p}_1 + l_1 k - \widetilde{p}_2^{'} = -\widetilde{p}_2 + \widetilde{p}_1^{'} - [l - l_1]k. \tag{7}$$

Аргумент δ-функції у виразі (2) визначає закон збереження 4-імпульсу для парціального процесу:

$$\widetilde{p}_1 + \widetilde{p}_2 + lk = \widetilde{p}_1^{'} + \widetilde{p}_2^{'}. \tag{8}$$

У виразах (6)-(8) $|l'|$ – кількість фотонів випроменених ($l' > 0$) або поглинутих ($l' < 0$) в першій вершині; $|l|$ – кількість фотонів поглинутих ($l > 0$) із хвилі або

випромененних ($l<0$) у хвилю за результатом всього процесу (так що $\left|l-l'\right|$ – кількість фотонів випромененних ($l-l'<0$) або поглинутих ($l-l'>0$) в другій вершині.

Ймовірність процесу

Диференційна ймовірність процесу в одиницю часу визначається виразом:

$$d\mathrm{w}_{fi}=\left|S_{l,l'}\right|^2\frac{V^2d^3p_1'd^3p_2'}{(2\pi)^6}==\left|C\right|^2\left(\frac{\left|T_{l,l'}^{(a)}\right|^2}{\left(\kappa_1^2\right)^2}+\frac{\left|T_{l,l'}^{(b)}\right|^2}{\left(\kappa_2^2\right)^2}+\frac{1}{\kappa_1^2\kappa_2^2}\left(T_{l,l'}^{(a)}T_{l,l'}^{(b)*}+T_{l,l'}^{(a)*}T_{l,l'}^{(b)}\right)\right)\times$$

$$\times\delta^{(4)}\left(p_1+p_2+lk-p_1'-p_2'\right)\frac{d^3p_1'd^3p_2'}{(2\pi)^2}. \tag{9}$$

Метою даного дослідження є розрахунок інтерференційного доданку в диференційній ймовірності (9):

$$T_{int}=T_{l,l'}^{(a)}T_{l,l'}^{(b)*}+T_{l,l'}^{(a)*}T_{l,l'}^{(b)}=2\mathrm{Re}\left(T_{l,l'}^{(a)}T_{l,l'}^{(b)*}\right) \tag{10}$$

Розрахунок на пряму дає:

$$T_{l,l'}^{(a)}T_{l,l'}^{(b)*}=\mathrm{Sp}\left\{\left[\hat{p}_2'+m\right]M_{l-l_1,\nu}(p_2',p_2)\left[\hat{p}_2+M\right]\overline{M_{l-l_1,\mu}}(p_1',p_2)\times\right.$$

$$\left.\times\left[\hat{p}_1'+m\right]M_{l_1}^{\nu}(p_1',p_1)\left[\hat{p}_1+m\right]\overline{M_{l_1}^{\mu}(p_2',p_1)}\right\}. \tag{11}$$

Однак цей вираз містить 10^4 доданків, причому найскладніший з них містить 16 γ-матриць. Також слід зауважити, що згортка по індексам μ, ν не зменшує кількість доданків, а збільшує, через заплутаність доданків, що їх містить.

Врахуємо, що

$$\overline{u}_{p_2}M_{l-l_1,\nu}(p_2,p_1)u_{p_2}=\mathrm{Sp}\left\{\left[\hat{b}+\gamma^5\hat{d}\right]M_{l-l_1,\nu}(p_2,p_1)\right\}, \tag{12}$$

де

$$b_\mu=\frac{1}{4}Sp\left\{\gamma_\mu u_{p_1}\otimes\overline{u}_{p_2}\right\},\quad d_\mu=\frac{1}{4}Sp\left\{\gamma_\mu\gamma^5u_{p_1}\otimes\overline{u}_{p_2}\right\}. \tag{13}$$

Розглянемо два базиси в 4-мірному просторі:

$$e_0^{(j)}=n_{\kappa_j},\quad e_1^{(j)},\quad e_2^{(j)},\quad e_3^{(j)}=\lambda^{(j)}\frac{n}{\left(nn_{\kappa_j}\right)}+n_{\kappa_j},\quad \lambda^{(j)}=e_0^{(j)2}=\mp1. \tag{14}$$

$$n_{\kappa_j}=\frac{\kappa_j}{\sqrt{\left|\kappa_1^2\right|}},\quad e_1^{(j)}=e_x-\frac{\left(\kappa_je_x\right)}{\left(k\kappa_j\right)}k,\quad e_2^{(j)}=e_y-\frac{\left(\kappa_je_y\right)}{\left(k\kappa_j\right)}k,\quad j=1,2. \tag{15}$$

Також нам знадобиться умова ортогональності струмів у вершинах:

$$\left(\kappa_{j,\mu}A^\mu\right)=\left(\kappa_{j,\mu}B^\mu\right)=0. \tag{16}$$

Згортку в $T_{l,l'}^{(a)}T_{l,l'}^{(b)*}$ по індексу ν запишемо в базисі (14) з $j=1$, а по μ в базисі з $j=2$, а також скористаємося умовою ортогональності (16):

$$T_{l,l'}^{(a)}T_{l,l'}^{(b)*}=\sum_{i=1}^{3}\mathrm{Sp}\left\{\left[\hat{b}_2+\gamma^5\hat{d}_2\right]\left(e_iM_{l-l_1}(p_2',p_2)\right)\right\}\mathrm{Sp}\left\{\left[\hat{b}_1+\gamma^5\hat{d}_1\right]\left(e_iM_{l_1}(p_1',p_1)\right)\right\}\times$$

$$\times\sum_{k=1}^{3}\left(\mathrm{Sp}\left\{\left[\hat{b}_{2'}+\gamma^5\hat{d}_{2'}\right]\left(e_k\overline{M_{l-l_1,\mu}}(p_1',p_2)\right)\right\}\mathrm{Sp}\left\{\left[\hat{b}_{1'}+\gamma^5\hat{d}_{1'}\right]\left(e_k\overline{M_{l_1}(p_2',p_1)}\right)\right\}\right) \tag{17}$$

де для спрощення запису позначено: $2\to p_2',p_2$; $1\to p_1',p_1$; $2'\to p_1',p_2$; $1'\to p_2',p_1$.

Розрахунки дають:

$$\mathrm{Sp}\left\{\left[\hat{b}+\gamma^5\hat{d}\right]\left(e_jM_l(p_2,p_1)\right)\right\}=4\left(L_l\left(be_j\right)-\frac{m}{4}\beta_+\left(D_le_j\right)(kb)\mp i\frac{m}{4}\beta_-\left(D_le_{y,x}\right)(kd)\right), \tag{18}$$

$$Sp\left\{\left[\hat{b}+\gamma^5\hat{d}\right](e_3M_l(p_2,p_1))\right\}=4\lambda\frac{L_l}{(nn_\kappa)}(bn). \tag{19}$$

Підставививши останні вирази в інтерференційний доданок (17) отримаємо:

$$\frac{1}{16}T^{(a)}_{l,l'}T^{(b)*}_{l,l'}=\left(\left(\frac{L_2L_1}{(kn_{\kappa_1})^2}+\frac{m^2}{16}\beta_{2+}\beta_{1+}(D_2e_1)(D_1e_1)\right)(kb_2)(kb_1)+L_2L_1[(b_2e_1)(b_1e_1)+(b_2e_2)(b_1e_2)]-\right.$$
$$-\frac{m}{4}\beta_{2+}L_1(D_2e_1)(kb_2)(b_1e_1)-L_2\frac{m}{4}\beta_{1+}(D_1e_1)(b_2e_2)(kb_1)+$$
$$\left.+i\frac{m}{4}\beta_{2-}L_1(D_2e_1)(kd_2)(b_1e_2)+i\frac{m}{4}\beta_{1-}L_2(D_1e_1)(b_2e_2)(kd_1)-\frac{m^2}{16}\beta_{1-}\beta_{2-}(D_1e_1)(D_2e_1)(kd_2)(kd_1)\right)\times$$
$$\times\left(\left(\frac{L_{2'}L_{1'}}{(kn_{\kappa_2})^2}+\frac{m^2}{16}\beta_{2'+}\beta_{1'+}(D_{2'}e'_1)(D_{1'}e'_1)\right)(kb_{2'})(kb_{1'})+L_{2'}L_{1'}((b_{2'}e'_1)(b_{1'}e'_1)+(b_{2'}e'_2)(b_{1'}e'_2))\right.$$
$$-\frac{m}{4}\beta_{2'+}L_{1'}(D_{2'}e'_1)(b_{1'}e'_1)(kb_{2'})-\frac{m}{4}\beta_{1'+}L_{2'}(D_{1'}e'_1)(b_{2'}e'_1)(kb_{1'})-i\frac{m}{4}\beta_{2'-}L_{1'}(D_{2'}e'_1)(kd_{2'})(b_{1'}e'_2)$$
$$\left.-i\frac{m}{4}\beta_{1'-}L_{2'}(D_{1'}e'_1)(b_{2'}e'_2)(kd'_1)-\frac{m^2}{16}\beta_{2'-}\beta_{1'-}(D_{2'}e'_1)(D_{1'}e'_1)(kd_{2'})(kd'_1)\right). \tag{20}$$

Отже розрахунок інтерференційного доданку в ймовірності вдалось звести до розрахунку 64 множників виду: $(\alpha\{b_2,d_2\})(\beta\{b_1,d_1\})(g\{b_{2'},d_{2'}\})(\delta\{b_{1'},d_{1'}\})$, де для величин в фігурних дужках мається на увазі їх послідовний перебір. Причому всі їх можна отримати знайшовши шпур загального вигляду:

$$S^{\lambda'_2,\lambda_2}_{\lambda'_1,\lambda_1}(c,d;a,b)=\frac{1}{4}Sp\left\{(\hat{p}'_2+\lambda'_2m)\hat{c}(\hat{p}_2+\lambda_2m)\hat{d}(\hat{p}'_1+\lambda'_1m)\hat{a}(\hat{p}_1+\lambda_1m)\hat{b}\right\}. \tag{21}$$

Наприклад,

$$(kb_{2'})(kb_{1'})(kb_2)(kb_1)=S^{1,1}_{1,1}(k,k;k,k). \tag{22}$$

Для (21) отримано явний вираз, але через громіздкість він тут не приводиться.

Висновки

Запропонований новий метод значно спрощує розрахунок інтерференційного доданку в ймовірності процесів 2-го порядку з фотонним проміжним станом в полі електромагнітної хвилі. Так замість знаходження шпурів від 10^4 доданків, найскладніший з яких містить 16 γ-матриць, вдалось перейти до розрахунку шпурів від 64 множників, що містять 8 γ-матриць. Причому не має необхідності розраховувати їх окремо, знайдений за формулою (21) шпур містить всі випадки.

Список використаних джерел

1. Bula, C., McDonald, K. T., Prebys, E. J., Bamber, C., Boege, S., Kotseroglou, T., Melissinos, A. C., Meyerhofer, D. D., Ragg, W…, "Observation of Nonlinear Effects in Compton Scattering", Phys. Rev. Lett. 76 (1996), pp. 3116--3119.

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

3. A.I. Nikishov, V.I. Ritus, "Quantum electrodynamics of phenomena in an intense field", Trudy FIAN 111 (1979), pp. 1-279.

Данильченко С.М.
кандидат фізико-математичних наук, зав. відділу
Запорожець В.К.
головний інженер
Новіков С.В.
інженер І категорії
Чіванов В.Д.
кандидат біологічних наук, заступник завідувача відділу
Інститут прикладної фізики НАН України,
м. Суми, Україна
danilserg50@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ ВОДНЮ В МЕТАЛАХ МЕТОДОМ ТЕРМІЧНОЇ ЕКСТРАКЦІЇ В ІНЕРТНОМУ ГАЗОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Розробка і впровадження аналітичних методів дослідження водню у конструкційних матеріалах зумовлена як сталим розвитком сучасної енергетики, так і започаткуванням новітніх водневих та гібридних ядерно-водневих технологій. В ІПФ НАН України створено експериментальну установку для дослідження водню та інших газоподібних домішок, розчинених у металах і сплавах, на принципі термічної екстракції у інертних газових середовищах з хроматографічною реєстрацією (Рис. 1).

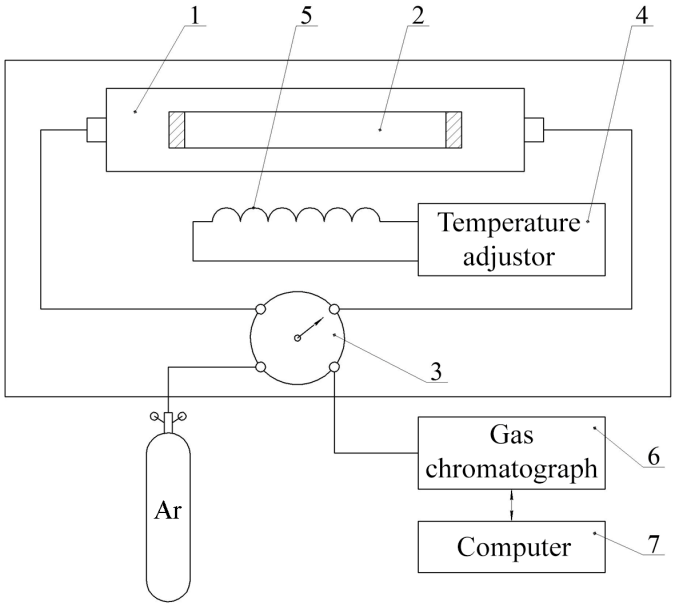


Рис. 1. Принципова схема експериментальної установки для визначення водню в металах на базі хроматографа «Селміхром-1»; 1 – система термічної газової екстракції (піч з управлінням), 2 – екстракційна камера (кварцова кювета), 3 – перемикач газових потоків.

У ході тестування установки досліджено температурно-стимульоване вивільнення водню зі зразків титану, цирконію, алюмінію, міді, різних марок сталі та бронзи. З метою оптимізації експериментальної установки та методики визначення кількісного вмісту водню в металах досліджено вплив на точність вимірювання робочого об'єму екстракційної камери та розміру і форми зразка. Зокрема, при багаторазовому повторюванні циклу «нагрів-аналіз-охолодження» досліджено виділення водню зі зразків міді, призначеної для модулів високо-градієнтних прискорюючих структур CLIC. Кожного циклу температура нагріву зразка в реакторі була близька до температури плавлення міді (~1100 °C), тривалість

нагріву за цієї температури – 5 хвилин. З результатів виявлено наступний розмірний ефект термічного виділення водню. Зразки міді відносно малої ваги (~100 мг) з більшим співвідношенням поверхня/об'єм виділяли основну частку водню вже при першому нагрівальному циклі. Зразки більшої ваги (300 – 1800 мг) з меншим співвідношенням поверхня/об'єм при першому нагрівальному циклі виділяли досить малу частку всього водню; при наступних циклах ця частка зростала, а потім спадала до рівня фону по мірі видалення усього наявного водню. Ці закономірності вказують на паралельне протікання поверхневих (десорбція/адсорбція) і об'ємних (дифузія водню у твердому і розплавленому металі) процесів у ході термічного аналізу. У зразках відносно більшого об'єму термічне видалення водню лімітується дифузійними процесами, які можуть протікати як у прямому, так і в зворотному напрямах (з об'єму до поверхні і навпаки). Відносно малі зразки з малим об'ємним ресурсом накопичення газу, безперешкодно (без затримки) віддають водень поверхневої локалізації, а слідом і об'ємний водень, чому сприяють короткі шляхи дифузії. На базі цих даних представляється можливим оцінювання співвідношення водню поверхневої та об'ємної локалізації.

До основних джерел похибок при вимірюванні вмісту водню в металах хроматографічним методом слід віднести:

1. Неповне вилучення при нагріванні в робочому газі (Ar); недостатня чистота робочого газу.

2. Осадження (адсорбція) водню, що виділяється, на більш холодних (відносно зразка) ділянках екстракційної камери та вхідної труби.

3. Осадження (адсорбція) виділеного водню на продуктах фракційного термічного випаровування (сублімації) зразка, які осіли/конденсувалися у відносно холодних ділянках екстракційної камери (спостерігається для зразків бронзи, схильних до фракційної термосублімації).

Отримані результати спрямовані на подальшу оптимізацію методики визначення водню, що має сприяти визначенню структурної локалізації та негативної ролі водню у матеріалах ядерної, термоядерної та водневої енергетики.

Дяченко М.М.
кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник,
Новак О.П.
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,
Холодов Р.І.
доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України,
Інститут прикладної фізики НАН України,
м. Суми, Україна
mykhailo.m.diachenko@gmail.com

ПОГЛИНАННЯ ФОТОНА ЧЕРЕЗ НАРОДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЇ ПАРИ В НАДКРИТИЧНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ

Актуальність дослідження процесу поглинання фотона через народження e^-e^+ пари в зовнішньому магнітному полі пов'язана передусім з наявністю таких фізичних об'єктів, як нейтронні зірки, в магнітосфері яких значення магнітного поля досягає критичного та перевищує його, зокрема, в магнітосфері магнітарів напруженість магнітного поля досягає 10^{15} Гс. Дослідженню процесу фотонародження пари присвячена достатньо велика кількість робіт, зокрема роботи [1-5], але мала увага приділялась саме дослідженню спін-

поляризаційних ефектів в надкритичному магнітному полі, саме таке дослідження проводиться в даній роботі.

В даній роботі проводяться розрахунки в релятивістській системі одиниць, в якій $\hbar = c = 1$. Також використовується калібрування Ландау для 4-потенціалу зовнішнього поля $A_{ext} = (0, 0, xH, 0)$. Діаграма досліджуваного процесу зображена на рис. 1.

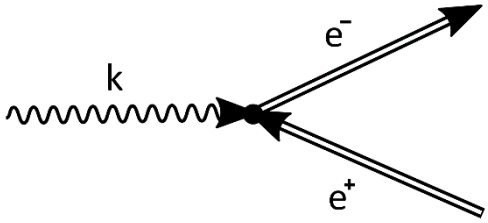


Рис. 1. Діаграма Фейнмана фотонародження $e^- e^+$ пари.

Згідно правил квантової електродинаміки, амплітуда процесу має такий вигляд:

$$S_{fi} = -ie \int d^4 x \bar{\psi}_e \gamma^\mu A_\mu \psi_p,$$

де γ^μ - матриці Дірака, A_μ - хвильова функція початкового фотона, $\bar{\psi}_e$ - хвильова функція кінцевого електрона та ψ_p - хвильова функція кінцевого позитрона.

В роботі розглядається випадок, коли фотон розповсюджується перпендикулярно відносно напрямку магнітного поля, що не впливає на загальність розгляду даної задачі. У цьому випадку порогова умова має вигляд:

$$\omega_{th} = m_e + m_p,$$

де $m_{e,p} = m\sqrt{1 + 2l_{e,p}h}$, $l_{e,p}$ - номери рівнів Ландау електрона та позитрона, $h = H/H_c$ - напруженість магнітного поля в одиницях критичного.

Було досліджено випадок надкритичного магнітного поля, коли $h >> 1$. При цьому розглянуто народження електрон-позитронної пари на найнижчі збуджені рівні Ландау при енергії фотона, близької до порогової. Були знайдені прості аналітичні вирази для ймовірностей процесу для довільно поляризованого фотона та для різних випадків спінів кінцевих частинок. На рис. 2 приведені такі залежності від магнітного поля для неполяризованого фотона та чисельні результати, коли одна з частинок пари народжується на першому збудженому рівні Ландау (перший рисунок) та коли обидві частинки утворюються на першому рівні (другий рисунок).

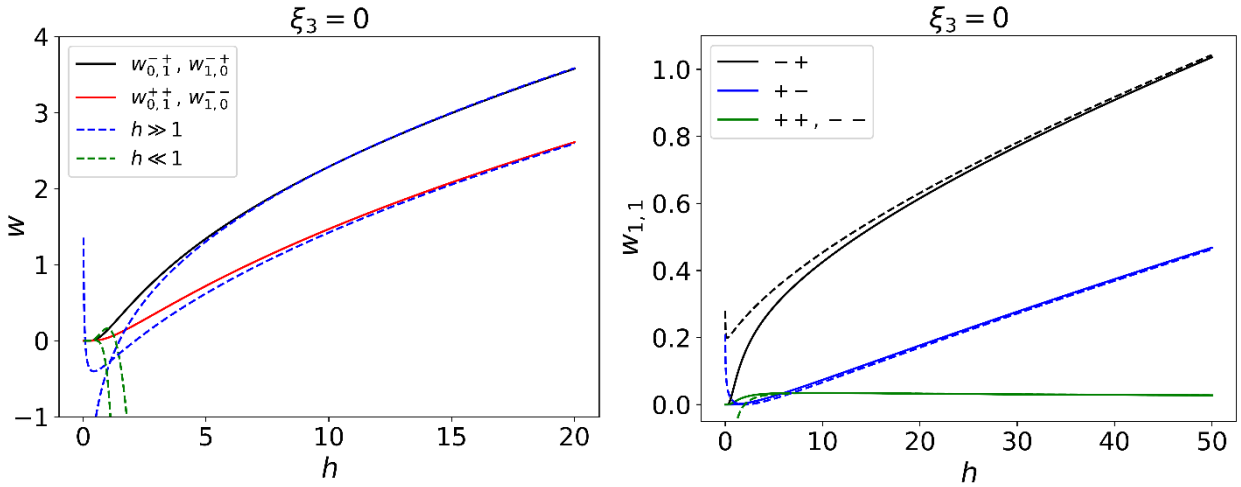


Рис. 2. Залежності ймовірностей процесу від магнітного поля.

Як видно з рисунків, отримані вирази у наближенні надкритичного магнітного поля добре узгоджують з чисельними результатами. Також на першому рисунку наведено для порівняння ультраквантовий випадок, який розглядався в роботі [6].

Список використаних джерел

1. J.K. Daugherty, I. Lerche, Physical Review D 14, 340 (1976).
2. J.K. Daugherty, A.K. Harding, The Astrophysical Journal 273, 761 (1983).
3. L. Semionova, D. Leahy, Astronomy & Astrophysics 373, 272 (2001).
4. A.Di Piazza, G. Calucci, Astroparticle Physics 24, 520 (2006).
5. A. Kostenko, C. Thompson, The Astrophysical Journal 869, 44 (2018).
6. O.P. Novak, R.I. Kholodov, Physical Review D 80, 025025 (2009).

Жуков А. О.
магістрант, спеціальність «014 Середня освіта (Фізика)»,
Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка,
м. Суми, Україна
Zhandrey9@gmail.com

ЕКСПЕРИМЕНТ ЯК ОСНОВА НАВЧАННЯ ФІЗИКИ

На початку розвитку науки найголовнішим методом дослідження було спостереження. Цей метод дозволяв насамперед отримувати інформацію про навколишній світ. Але такий метод має багато недоліків. Деякі процеси, які потрібно було дослідити, могли з’являтися через великий проміжок часу, або фіксуватися взагалі тільки один раз за життя вченого. Також велику роль відігравало те, що багато процесів можна було спостерігати тільки в визначених умовах та місцях. Треба було вирішувати ці проблеми, зробити досліджуваний процес незалежним від часу, умов та території, а також мати можливість впливати на процес. Вирішенням даної проблеми став експеримент. [1]

Експеримéнт (англ. experiment) — сукупність дослідів, об'єднаних однією системою їх постановки, взаємозв'язком результатів і способом їх обробки. Унаслідок експерименту отримують сукупність результатів, які допускають їхню сумісну обробку і зіставлення. [2]

Навчання фізики за допомогою експериментів має в собі велике різноманіття в типах та методів викладання. Експерименти можна умовно поділити на демонстраційні та лабораторні. При демонстраційному експерименті головною дійовою особою є вчитель, він проводить організаційну роботу, та сам дослід. У лабораторному експерименті основною дієвою особою є вже учень. Як і в демонстраційному експерименті вчитель повинен організувати навчальний процес, але проведення самого експерименту залишається за учнями. Лабораторний експеримент є дуже різноманітним, він може бути однаковим для усіх учнів, або бути індивідуальним для кожного, проводитися в шкільній лабораторії, або позакласно як домашня робота, може мати додаткові завдання та містити задачі. Тому лабораторну роботу можна розділити ще на декілька видів: фронтальні, фізичний практикум, експериментальні задачі, домашні спостереження та досліди. [3]

Шкільний фізичний експеримент підводить учнів до розуміння сучасних фізичних методів дослідження, виробляє у них практичні вміння і навички. Навчання фізики ми уявляємо як процес формування системи знань, умінь і навичок. Будь-яку систему ми розуміємо як єдине ціле, що складається з елементів, між якими існує логічний зв’язок і будь-яка зміна елементів чи зв’язків приводить до утворення нової структури. Отже, під системою навчального експерименту ми розуміємо сукупність взаємопов’язаних складових навчального обладнання, методів і методичних прийомів, технології реалізації домінуючої парадигми навчання і виховання.

Список використаних джерел

1. Основи теорії планування експерименту: Навч. посіб. для студ. / В. М. Засименко; Держ. ун-т «Львів. політехніка». — Л., 2000. — 204 с.
2. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. / за ред. В. С. Білецького, 2004. 640 с.
3. Садовий М.І. Вибрані питання загальної методики навчання фізики : навчальний посібник. – Кіровоград. «Авангард», 2013. – 253 с.

Ігнатьєв І. Г.,
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,
Москаленко В. Б.,
провідний інженер,
Інститут прикладної фізики НАН України,
м. Суми, Україна
igignatew@gmail.com

ПРИСКОРЮВАЧ ДЛЯ ПРОТОННО - ПРОМЕНЕВОЇ ЛІТОГРАФІЇ

Протонно-променева літографія (ППЛ) є літографічною технологією високої роздільної здатності, яка може бути використана для фабрикації 3D мікро- та наноструктур різного застосування [7]. Головною характеристикою технології є здатність швидко відтворювати довільну структуру в полімері з високим ступенем точності.

В даний час в Інституті прикладної фізики НАН України ведуться роботи з розробки та створення установок протонно-променевої літографії високої роздільної здатності. Як джерело протонів використовується електростатичний прискорювач (ЕСП) «Сокіл» у складі Аналітичного прискорювального комплексу [1]. На установці (каналі протонно-променевої літографії в складі протонного мікрозонда) проводяться експерименти зі створення поверхневих мікро-і нано структур з необхідними параметрами.

Однак, у зв'язку з тим, що ЕСП «Сокіл» є установкою, виготовленою у 80-х роках минулого століття, проведення низки робіт з протонно-променевої літографії утруднено, внаслідок їх високої вартості та складності проведення експериментів. У зв'язку з цим ведеться розробка малогабаритного прискорювача, що задовольняє сучасним вимогам: простота в експлуатації, низька енергоємність, висока надійність.

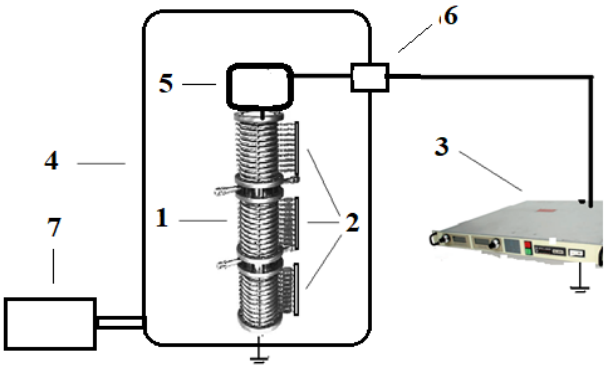


Рис. 1. Схема високовольтної структури. 1 – ПТ, 2 – резисторний дільник напруги (резистори SGT26), 3 – джерело високої напруги SL130P10 на 130 кВ [5], 4 – бак, 5 – кондуктор (високовольтний електрод), 6 – високовольтний ввід, 7 – система очищення повітря у баку.

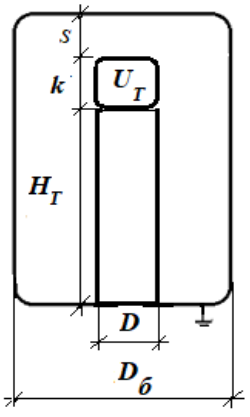


Рис. 2. Розрахункова схема ЕСП-130, U_T – напруга триплету ПТ.

Схема високовольтної структури електростатичного прискорювача на напругу 130 кВ (далі за текстом ЕСП-130) представлена на рис. 1. Установка проектується з урахуванням триплету секцій прискорювальної трубки (ПТ) PELLETRON - 6 [3].

Розрахунок електростатичного поля високовольтної структури проводився за допомогою чисельного коду Laplas2D, що реалізує метод інтегральних рівнянь [4].

Розрахунок пробивної напруги високовольтної газоізольованої структури ЕСП-130 – за методикою, викладеною в роботі [4]. Методика заснована на статистичному методі, що ґрунтується на чисельному моделюванні ймовірності пробою системи газоізольованих електродів (законі зростання) [2].

1. Електрична міцність вакуумної ізоляції триплету прискорюючої трубки ЕСП PELLETRON-6 становить величину не менше 500 кВ при тиску в ПТ 10^{-4} Па [3]. Таким чином, забезпечено триразовий запас електричної міцності.
2. Згідно з даними чисельного моделювання за методикою, описаною у роботі [4], електрична міцність атмосферної ізоляції ЕСП-130 не менше 150 кВ (при номінальній напрузі прискорювача 130 кВ).
3. Подану в проекті установку передбачається застосувати в прискорювачі для протонно-променевої літографії високої роздільної здатності.

Список використаних джерел

1. Buhay O. M. et al. Current Status of the IAP NASU Accelerator-Based Analytical Facility// Physics Procedia. 2015. (66) C.166-176.
2. Hauschild W., Mosch W. Statistical Techniques for High - voltage Engeniring. London: Peter Peregrinus Ltd., 2019. 312 p.
3. Hellborg R. Electrostatic Accelerators Fundamentals and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 620 p.
4. Игнатьев И. Г. Электрофизика электростатических ускорителей заряженных частиц. Исследование высоковольтной структуры. Саарбрюккен: LAP, 2016. 88 с.
5. Котов В. Г. Источники высокого напряжения. Саарбрюккен: LAP, 2018. 208 с.
6. Пономарев А. Г., Ребров В. А., Колинько С. В. Установка протонно-лучевой литографии на базе электростатического ускорителя для фабрикации 3D микро- и наноструктур// Nauka innov. 2019. 15(4) С. 62 69.
7. Пономарев А. Г. та ін. Фабрикация микрокомпонентов для рентгеновской оптики с применением протонно-лучевой литографии. // Материалы XVIII конференции по физике высоких энергий и ядерной физике, Харьков, 24 - 27 марта 2020 г. Харьков, 2020. С. 104.

Каленик М.В.
кандидат педагогічних наук, декан фізико-математичного факультету,
Борисенко А.М.
магістрантка, спеціальність «014 Середня освіта (Фізика)»,
Сумський державний педагогічний університет імені А.С. Макаренка,
м. Суми, Україна
mvkalenik@gmail.com
anassstasiia@gmail.com

ПРОБЛЕМИ ВИКЛАДАННЯ ФІЗИКИ В ШКОЛІ В УМОВАХ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ

У сучасних умовах при поширенні коронавірусної інфекції, під час війни, відключенні електропостачання велике значення набуває дистанційне навчання шкільних предметів, у тому числі фізики. Навчальний процес не слід переривати, і навчальні програми мають бути виконані у повному обсязі. Цього можна досягти лише за дистанційного навчання, для чого необхідно використовувати будь-які технічні можливості інтернету, телебачення.

Розглянемо можливості навчання фізики під час використання інформаційних технологій, визначення проблемних моментів навчання фізики у дистанційному форматі, аналіз чинників, які впливають на якість навчання фізики в школі.

Специфіка дистанційного навчання зводиться до того, що дистанційне навчання здійснюється за допомогою комп'ютера з виходом в Інтернет, існує можливість застосування синхронної та асинхронної методик навчання, існують особливі форми занять, що застосовуються у дистанційному навчанні фізики.

До них можна віднести чат-заняття та веб-заняття, тобто заняття з використанням інформаційно-комунікаційних технологій. Ці типи занять передбачають текстове, голосове спілкування чи спілкування з використанням сервісів відеоконференцій. Прикладом заняття такого типу може бути проведення відеоконференції. Ця форма найбільш наближена до очного навчання: вчитель у режимі реального часу передає інформацію учням, ставить та відповідає на запитання. Для цього способу проведення уроків існує безліч програм реалізації відеозв'язку: Skype, Zoom, Google Meet, Discord, Microsoft Teams та інші. Сучасні платформи дозволяють записувати уроки, щоб можна було у зручний час переглянути, повторити матеріал, що є безперечним плюсом у порівнянні з традиційним навчанням у класі. Однак, можуть виникнути складності, пов'язані зі швидкістю роботи Інтернет-з'єднання або недостатньою технічною оснащеністю та комп'ютерною грамотністю педагога.

Коли неможливо провести онлайн-заняття, використовується методика асинхронного дистанційного навчання. При застосуванні цієї методики більше відповідальності за проходження навчання доручається самостійність учня. На перший план висувається самонавчання, індивідуальний темп навчання, а також регулювання темпу учня. Це особливо актуально в регіонах з нестійким покриттям Інтернет-з'єднання без можливостей підключення дротового інтернету. Ще одним позитивним моментом даного виду навчання є те, що учні можуть виконувати завдання у зручний для них час із необхідними перервами. Проте зникає можливість живого спілкування вчителя з учнем, що значно погіршує якість освіти. Також не всі учні, особливо молодшого та середнього шкільного віку можуть самостійно організувати навчальний процес, відкладаючи виконання завдань на пізніший термін. Тому необхідно підвищувати мотивацію школярів на вивчення нового матеріалу.

Так само сприяють кращому засвоєнню навчального матеріалу уроки, що транслюються телевізійними каналами, записи уроків, демонстрацій різноманітних експериментів в YouTube, проведення консультацій та викладення матеріалів уроку (презентації, конспекти) в спеціально створених учителем групах соціальних мереж. Це особливо важливо для учнів з особливо небезпечних районів, при періодичному відключенні світла, перебуванні учнів за межами країни (різниця часових поясів).

Але в дистанційній підготовці, заснованій тільки на вивченні відеоматеріалів, немає зворотного зв'язку учня з учителем, який пояснює даний матеріал, школяр не може поставити питання, що його цікавлять, по даній темі. Також при перемиканні уваги на фактори, що відволікають, учень може втратити хід міркування, що може призвести до прогалин у знаннях.

Для досягнення найбільшої ефективності фахівці рекомендують застосовувати методики змішаного дистанційного навчання. Дані методики мають на увазі, що програма навчання будується на поєднанні як синхронного, так і асинхронного навчання. Вони повинні забезпечувати засвоєння теоретичної інформації курсу фізики у повному обсязі, передбаченому навчальним планом, повинні забезпечувати прямий та зворотний зв'язок учень – вчитель, як оперативний, так і відстрочений, повинні забезпечувати формування та підтримку мотивації учня.

Тим не менш, у дистанційному навчанні присутні як позитивні, так і негативні моменти. Серед позитивних моментів можна відзначити такі моменти, як можливість не переривати навчальний процес, виховання самостійності школярів, формування навичок

роботи з комп'ютером, формування навичок пошуково-дослідницької діяльності, використання автоматичної перевірки тестів полегшує роботу вчителя.

У дистанційного навчання, безперечно, є й негативні сторони. Серед негативних моментів можна відзначити такі моменти, як погане технічне оснащення, яке не дозволяє повною мірою засвоїти необхідний теоретичний матеріал з фізики, відсутність живого зв'язку вчителя з учнем, обмежені можливості перевірити самостійність виконання роботи учня, зниження вмотивованості учнів.

Для зниження негативних факторів дистанційної освіти потрібна взаємодія не тільки школи та учня, а й активна участь телекомунікаційних організацій.

На навчання фізики впливають усі вище перелічені чинники, проте можна назвати і специфічні особливості при дистанційному вивченні фізики. Особливі складнощі виникають під час проведення лабораторних робіт. Деякі лабораторні роботи учень може провести самостійно вдома, проте багато хто з них провести в домашніх умовах важко, а багато й зовсім нездійсненні, наприклад, неможливо провести такі роботи, як «Вимірювання сили струму в ланцюзі з конденсатором», «Вимірювання індуктивного опору котушки», «Визначення довжини світлової хвилі за спостереженням дифракції від щілини». Але в той же час існують різні програми, що дозволяють моделювати процес, що вивчається, також створено достатню кількість навчальних відео та презентацій лабораторних робіт.

Також виникають складнощі з виведенням фізичних формул. Досить важко відобразити в онлайн-режимі формули, їх написання та виведення без класної дошки.

Аналогічні проблеми і при поясненні розв'язування задач. Проте існують інтерактивні онлайн-дошки, хоча з використанням можуть виникнути проблеми технічного характеру. Наприклад, відсутність графічного планшета або документ-камери ускладнює запис формул. Можливості обмежені, а використання спеціальних програм вимагає додаткових знань і умінь вчителя.

Крім того, під час онлайн-навчання випадає з навчального процесу робота як зі шкільними зошитами, так і з зошитами для лабораторних робіт з фізики. Перевірка домашнього завдання викликає певні труднощі. Наприклад, внесення поправок, виправлень, доповнень у роботу учня. Також оформлення завдань викликає технічні складності. Кожен вчитель намагається створити власну електронну базу даних для кожного уроку (презентації, відео експериментів, тестові завдання, різноманітні застосунки), але, на наш погляд, це доцільно зробити на рівні держави для кожного навчального предмета, причому така хмарна електронна база повинна мати відкритий доступ для зареєстрованих користувачів із можливістю додавання власних розробок із підтвердженням та фіксацією авторського права.

Список використаних джерел

1. Defining eLearning / Performance, Learning, Leadership, & Knowledge Site. [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.nwlink.com/~donclark/ hrd/elearning/define.html.

2. Georgiev, T. M-learning – a New Stage of E-learning / Georgiev, T., Georgieva, E., Smrikarov, A. // Proceedings of the 5-th International Conference on Computer Systems and Technologies – CompSysTech'2004 – Rousse, 2004. – P. IV.28–1 – IV.28–5.

3. Rosenberg M. Beyond E-Learning: New Approaches to Managing and Delivering Organizational Knowledge / Marc J. Rosenberg, Ph. D. // ASTD International Conference – June 3 – Atlanta, 2007.

4. Іваницька Н. Переваги та недоліки дистанційного навчання фізики // Наукові записки [Кіровоградського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка]. Серія: Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти. – 2015. – Вип. 7(1). – С. 188-192.

5. Каленик М.В. Використання довгострокових завдань з фізики для оцінки практичних умінь старшокласників // Збірник наукових праць. Педагогічні науки. Випуск 24. – Херсон: Айлант, 2001. – С. 198-201.

Каленик М.В.
кандидат педагогічних наук, декан фізико-математичного факультету,
Цирулик Є.О.
магістрантка, спеціальність «014 Середня освіта (Фізика)»,
Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка,
м. Суми, Україна
mvkalenik@gmail.com
tsurylukl@gmail.com

РОЗВИТОК ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ЗДІБНОСТЕЙ УЧНІВ ОСНОВНОЇ ШКОЛИ ПРИ НАВЧАННІ ФІЗИКИ

Сьогодні питання розвитку інтелектуальних здібностей молодих людей стоїть особливо гостро, оскільки одним із вирішальних факторів економічного зростання на сьогоднішній день виявляється інтелектуальне виробництво, а ключовою формою власності – інтелектуальна власність. У цих умовах робота інтелекту постає як гарантія особистої свободи людини, що забезпечує можливість вибору виду праці.

Розвиток інтелектуальних здібностей учнів - процес індивідуальний, отже, підвищення його ефективності у процесі навчання необхідно використовувати особистісно-орієнтований підхід і враховувати індивідуальні особливості учнів. У той же час розвиток інтелектуальних здібностей учнів підліткового віку відбувається у процесі формування понятійного мислення під керівництвом дорослих. У разі сучасної школи – це колективний спосіб навчання. Отже, актуальним є питання пошуку можливостей інтеграції індивідуальної роботи учнів з колективними формами формування нових знань.

У підлітковому віці розвиток всіх компонентів інтелектуальних здібностей залежить передусім від розвитку понятійного мислення учнів, що у процесі навчання фізиці можна розвивати під час формування в учнів наукових понять. Особливу увагу при формуванні понять у процесі навчання фізики в основній школі слід звернути на розвиток в учнів вміння проводити логічні операції, що лежать в основі процесу утворення понять; на формування вміння оперувати образами та здійснювати словесно-образний переклад інформації; на використання під час вирішення проблем прийомів продуктивної діяльності.

Для найефективнішого розвитку інтелектуальних здібностей учнів підліткового віку необхідна інтеграція індивідуальної та колективної діяльності учнів, оскільки, з одного боку, здібності учнів розвиваються лише за їх включенні у самостійну діяльність, з другого боку, – у підлітковому віці найбільший розвиваючий ефект дає формування понятійного мислення, яке, перебуваючи у зоні найближчого розвитку підлітка, найкраще розвивається з допомогою вчителя, що у умовах сучасної школи можливо лише у колективної діяльності учнів.

У дослідженнях Л.С. Виготського [1] доведено, що перевага формування системи понять перед формуванням одиничних понять з погляду розумового розвитку підлітка полягає в тому, що поза системою у поняттях можливі лише емпіричні зв'язки (зв'язки між самими предметами). Разом із системою понять виникають і надемпіричні зв'язки (опосередковане відношення понять до об'єктів та зв'язку між поняттями). Для того, щоб підвищити ефективність процесу формування понять, необхідно цілеспрямовано та систематично проводити узагальнення та систематизацію знань учнів на доступному для них рівні понять.

Таким чином, умовами розвитку інтелектуальних здібностей учнів під час навчання фізики в основній школі є:

- інтелектуальні здібності учня розвиваються при його включенні до індивідуальної розумової діяльності;
- понятійне мислення, що знаходиться у зоні найближчого розвитку учнів, найефективніше формується за допомогою вчителя у колективної діяльності учнів.

Найбільший розвиваючий ефект досягається у процесі формування системи наукових понять.

Процес формування понять супроводжується формуванням розумових дій, до яких відносяться логічні операції, прийоми продуктивної діяльності, словесно-образний переклад інформації та оперування образами. У процесі утворення фізичних понять, наприклад, беруть участь такі розумові операції, як аналіз відомих фактів та їх порівняння з метою виділення загальних властивостей, а також абстрагування від несуттєвих властивостей та узагальнення суттєвих, у результаті якого утворюється поняття. Якщо учень немає хоча б однієї з цих логічних операцій, процес утворення поняття неможливий. У зв'язку з цим, одне із завдань вчителя фізики, вирішення якої сприяє розвитку інтелектуальних здібностей учнів основної школи, полягає в тому, щоб удосконалювати в учнів розумові дії, що лежать в основі утворення понять безпосередньо у процесі їх формування [2].

На думку Дж. Брунера, П. Гальперіна та інших психологів для підвищення ефективності інтелектуального розвитку учнів їх необхідно якомога раніше знайомити зі способом пізнання, характерним для науки, що вивчається. Можливості вивчення учнями основної школи основ теорії наукового пізнання розкрито в роботах Дж. Гилфорда, О. Давиденка, В. Розумовського, В. Мощанського, О. Ляшенко, Л. Шарко, М. Каленика, П. Атаманчука, М. Мартинюка, Ю. Буряка, О. Пометун та інших вчених-методистів. Отже, для формування понять необхідно враховувати логіку наукового пізнання.

Формувати вміння здійснювати логічні операції та навчати використанню прийомів продуктивної діяльності можна як у процесі виконання завдань, при вирішенні яких необхідно виконати відповідні розумові дії, так і за допомогою прикладів використання прийомів продуктивної діяльності вченими для вирішення поставлених у наукових дослідженнях завдань. До завдань, виконання яких вимагає застосування логічних операцій, і використання прийомів продуктивної діяльності, ставляться завдання формування вміння висувати гіпотези. При формуванні понять з урахуванням логіки наукового пізнання завдання такого виду використовуються на етапах формулювання проблемних питань і висування гіпотез.

Оперування образами передбачає, по-перше, виконання логічних операцій із образами. Тому учням слід пропонувати завдання виконання логічних операцій як із термінами, і з образами (рисунками, графіками, образами, що виникають під час спостереження реальних об'єктів і явищ). По-друге, оперування образами є уявний рух образів. Розвивається дане вміння під час виконання завдань для проведення уявних спостережень та експериментів [3].

Словесно-образний переклад інформації здійснюється за словесного опису побаченого чи, навпаки, при побудові образу за описом. Дане вміння розвивається під час виконання завдань оперування образами, якщо учні у своїй пояснюють свої рішення чи виконання своїх дій під час вирішення завдань.

Завдання стає засобом навчання і водночас засобом розвитку інтелектуальних здібностей у разі, коли його виконання включає учнів у пізнавальну діяльність, підпорядковану певній меті. Ми пропонуємо такий спосіб організації пізнавальної діяльності учнів на основі виконання завдань, який дозволяє контролювати не тільки кінцевий результат вивчення поняття, а й сам процес його засвоєння: подібний спосіб дає можливість усьому класу просуватися в єдиному темпі при освоєнні кожної нової теми програми, а кожному учневі засвоювати знання на індивідуальному для себе рівні.

Спільна навчально-пізнавальна діяльність учнів на основі виконання завдань складається з наступних кроків:

- створення кожним учнем свого освітнього продукту в процесі індивідуальної діяльності, який є результатом виконання учнями різних завдань;

- порівняння індивідуальних освітніх продуктів між собою, у процесі колективного обговорення, внаслідок чого власний продукт кожним учням переосмислюється та добудовується;

- Спільне формулювання висновків, на основі яких можна будувати нову діяльність учнів.

Для того, щоб забезпечити безперервність навчально-пізнавальної діяльності протягом усього уроку, ці кроки повинні циклічно повторюватися, і в результаті виконання всіх кроків одного циклу учні повинні отримати знання, які дозволять їм впоратися із завданням наступного циклу.

Розбиття процесу формування поняття на етапи дозволяє формувати поняття відповідно до логіки наукового пізнання (факти - гіпотеза - доказ - наслідки), а також реалізувати всі етапи формування поняття у свідомості людини (аналіз фактів - порівняння - узагальнення).

При підготовці до проведення уроків запропонованим способом слід здійснити аналіз нового матеріалу з метою виділення в ньому тих дій, які учні можуть виконати самостійно і для виконання яких можна підібрати або скласти індивідуальні завдання. Необхідно також стежити за тим, щоб завдання були різного рівня складності, але при їх виконанні учні здійснювали одні розумові дії (порівняння, абстрагування, узагальнення тощо) і за тим, щоб результат виконання завдання «сильними» та «слабкими» учнями мав значення для колективного вивчення нової теми [4].

Якщо передбачається робота у групах, слід продумати найбільш доцільний спосіб об'єднання учнів у групи (з урахуванням цілей уроку, видів використовуваних завдань, симпатій і антипатій учнів).

Для того, щоб підвести учнів до формулювання гіпотез, яке потім можна було б перевірити експериментально або пояснити на основі наявних у учнів знань, можна застосовувати завдання використання прийомів продуктивної діяльності. При вивченні фізичних величин, які визначаються через математичні залежності або входять як коефіцієнти до законів, гіпотези можуть бути припущенням про характер залежності однієї величини від іншої, яку можна перевірити на досвіді. При вивченні явища це можуть бути припущення про характер перебігу явища у змінених умовах або з іншими об'єктами.

Аналогічно спільну діяльність учнів можна організувати під час уроків розв'язання задач, уроках узагальнення та систематизації знань.

Список використаних джерел

1. Виготський Л.С. Розвиток мови і мислення. – М., 1983. – 456 с.

2. Каленик В.І., Каленик М.В. Питання загальної методики навчання фізики / Пробний навчальний посібник. – Суми: Редакційно-видавничий відділ СДПУ ім. А.С. Макаренка, 2000. – 125с.

3. Каленик М. Поняття компетенція, компетентність, навчальні досягнення учнів з фізики / М. В. Каленик // Зб. наук. праць. Наукові записки. – Вип. 90. – Серія: Педагогічні науки. – Кіровоград: РВВ КДПУ ім. В. Винниченка. – 2010. – 350 с., С. 117 - 120.

4. Каленик М. Реалізація індивідуалізації навчання при вивченні фізики в школі / М. В. Каленик //Фізико-математична освіта. – 2018. – Вип. 3. – С. 51-56. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/fmo_2018_3_11

Каленик М.В.
кандидат педагогічних наук, декан фізико-математичного факультету,
Шатова О.Д.
магістрантка, спеціальність «014 Середня освіта (Фізика)»,
Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка,
м. Суми, Україна
mvkalenik@gmail.com
elisha199512@gmail.com

MIND-MAP ТЕХНОЛОГІЯ ЯК ОДНА З ФОРМ РОЗВИВАЮЧОГО НАВЧАННЯ

На сьогоднішній день сучасне суспільство вимагає від випускників школи не лише багажу міцних знань, а й наявності таких здібностей як: самостійність, здатність мислити та створювати нові ідеї, вирішення проблем нестандартними способами. Всі ці здібності формує система розвиваючого навчання, головні особливості якого: це активно-діяльнісний метод навчання, що прийшов на зміну пояснювально-ілюстративному методу, розвиваюче навчання враховує і використовує закономірності розвитку, пристосовується до рівня та особливостей індивіда; педагогічні дії в даному виді навчання випереджають, стимулюють, спрямовують та прискорюють розвиток спадкових даних особистості; дитині відводиться роль самостійного суб'єкта, що взаємодіє з навколишнім середовищем; розвиваюче навчання спрямовано розвиток цілісної сукупності якостей особистості; розвиваюче навчання створює зону найближчого розвитку, викликає, спонукає, надає руху внутрішнім процесам психічних новоутворень.

У системі навчання, завданням вчителя є залучення учнів у активну творчу діяльність, де учасники процесу навчання взаємодіють один з одним, будують діалоги і самостійно отримують знання.

Одним із найзручніших методів досягнення цієї мети на уроках фізики прийнято вважати використання технології ментальних карт та метод міні-проектів.

Інтелект-карта, відома також як ментальна або асоціативна карта (з англійської «Mind map» – «карти розуму», «інтелект-карти», «карти пам'яті», «ментальні карти», «асоціативні карти», «Діаграма зв'язків», «асоціативні діаграми» або «схеми мислення») – спосіб зображення процесу загального системного мислення за допомогою схем. Метод використання інтелект-карт розроблений психологом Тоні Бьюзеном, який під час свого навчання шукав спосіб ефективного запам'ятовування та систематизування інформації [1].

Ментальна карта реалізується як деревоподібна схема, де зображені слова, ідеї, завдання чи інші поняття, пов'язані гілками, що відходять від центрального поняття чи ідеї. В основі цієї техніки лежить принцип «радіантного мислення» (від лат. radians - «промені, що випускає»), що відноситься до асоціативних розумових процесів, відправною точкою або точкою докладання яких є центральний об'єкт. У свою чергу, «радіантне мислення» – це асоціативне мислення, відправною точною якого є центральний образ. Від центрального образу на всі напрямки розходяться промені до меж аркуша. Над променями пишуть ключові слова або малюють образи, які з'єднують між собою розгалуженими лініями. Подібний запис дозволяє інтелект-карті зростати безмежно та постійно доповнюватися. Це показує нескінченну різноманітність можливих асоціацій і, отже, невичерпність можливостей мозку.

Метод інтелект-карток дозволяє:

- формувати комунікативну компетентність у процесі групової діяльності;
- формувати вміння, пов'язані зі сприйняттям, переробкою та обміном інформацією (конспектування, анотування, участь в аналітичних оглядах тощо);
- поліпшувати всі види пам'яті (короткочасну, довготривалу, семантичну, образну тощо) учнів;
- пришвидшувати процес навчання.

Дуже зручно використовувати даний метод щодо таких компонентів змісту шкільного курсу фізики, які пов’язані зв’язками поглинання і перетинання, наприклад, «Механічний рух», «Прості механізми», «Внутрішня енергія», «Теплові двигуни» тощо [2].

Дані теми припускають великий обсяг матеріалу, що конспектується, який важко сприймається і запам'ятовується. Тому я пропоную учням роботу в парах з розробки ментальних карток. Спочатку учні одержують макет, граф, структуру карти, яку їм пропонується заповнити самостійно по ходу уроку (назва компоненту в центрі, від неї йдуть основні характеристики та властивості з обох боків). Другим етапом вже пропонується учням самим проявити креативність і самостійність і скласти карту розуму на задану тему в паперовому вигляді. Далі за допомогою Інтернету учні будують ментальні карти в електронному вигляді. Для цього є спеціальне програмне забезпечення таке як:

Coggle є безкоштовним онлайн додатком, XMind є популярною кросплатформовою програмою для складання ментальних карт, працює на платформах Windows/Mac/Linux. Програма Freemind є відкритим безкоштовним додатком, Bubble.us – безкоштовний веб-додаток для складання інтелекту карт в режимі онлайн. Програма WiseMapping є безкоштовною онлайн - програмою для створення інтелект карт, що працює на відкритому коді HTML5 [4].

Даний метод дуже часто також застосовується на уроках фізики в 7 класі, де учні можуть показати творче розуміння фізичних процесів та явищ, що відбуваються у природі та навколо них.

Наприклад, за темою: "Фізика наука про природу". Учням з перших уроків дається визначення "фізика" – центр ментальної карти. Їхнє завдання: зобразити карту, в якій показано все те, що пов'язує їх зі словом фізика.

Дана технологія вважається дуже ефективною в навчанні з низки причин: дозволяє в інтерактивному режимі вести роботу з підготовки до ДПА та ЗНО в системі, використовуючи великоблочний метод закріплення знань, заощадити час; всі набуті знання учнів зберігаються у пам'яті значно довше, а частка засвоєного матеріалу значно вища; пошукова система Інтернет та навчальна література дають учням можливість створювати свій власний інноваційний продукт – інтелект-картки; інтелект-карти можна використовувати як демонстраційний або роздатковий матеріал при узагальнюючому повторенні, створенні презентації організації індивідуальної та групової роботи з підготовки до ДПА та ЗНО [5].

Таким чином, процес побудови інтелект-карт робить навчання в школі творчим і захоплюючим, дозволяючи кожному учневі проявити самостійність та ініціативу, вміння аналізувати, порівнювати, знаходити правильні способи вирішення поставленого завдання, що є дуже важливою складовою у розвиваючому навчанні.

Список використаних джерел

1. Бьюзен Т. Научите себя думать / т. Бьюзен. – Минск: Попурри, 2004. – 192с.

2. Каленик В.І., Каленик М.В. Питання загальної методики навчання фізики / Пробний навчальний посібник. – Суми: Редакційно-видавничий відділ СДПУ ім. А.С. Макаренка, 2000. – 125с.

3. Кіндрат І. Використання інтелект-карт у плануванні та організації освітнього процесу/ І. Кіндрат // Нова пед.думка. – 2012. – №4. – С. 153-156.

4. Позднякова Т.Є. Візуалізація та структурування інформації за допомогою ментальних карт на уроках біології: [науково-методичний посібник] / Т.Є. Позднякова. – Рівне: РОІППО, 2018. – 50с.

Коломієць В. М.
кандидат фізико-математичних наук, завідувач сектору,
Шкурат О. І.
завідувач науково-дослідного центру,
Кравченко С. М.
молодший науковий співробітник,
Кононенко І. М.
молодший науковий співробітник
Інститут прикладної фізики НАН України,
м. Суми, Україна
vkolom8@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ВНУТРІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ СТВОЛІВ АРТИЛЕРІЙСЬКОГО ОЗБРОЄННЯ

Сучасні вимоги щодо збільшення дальності та швидкості стрільби, а також початкової швидкості снаряда вимагають використання більш високоенергетичних порохів, що призводить до підвищеної ерозії матеріалу ствола. Традиційні хромові покриття внутрішньої поверхні стволів вже не здатні забезпечити необхідний ресурс їх живучості, що приводить до необхідності пошуку нових матеріалів та технологій отримання захисних покриттів.

З літературних джерел відомо, що досить перспективним матеріалом для захисту стволів може бути двошарове покриття з Ta і Nb. Тантал має велику твердість і температуру плавлення, а ніобій має гарну адгезію до гарматної сталі, виконує функції демпфування та антиводневого бар’єру [1].

Виходячи з вищевикладеного, метою роботи є дослідження фізико-механічних властивостей покриттів Ta/Nb/П (П-підкладка), які отримані за допомогою розробленої та створеної в Інституті прикладної фізики НАН України циліндричної магнетронної розпилювальної системи [2] з використанням технології магнетронного розпилення імпульсами високої потужності (HiPIMS – High-power impulse magnetron sputtering).

На створеному експериментальному стенді [2] відпрацьовано технологічний процес модифікації внутрішньої поверхні макету ствола калібру 30 мм та проведено напилення двошарових покриттів з Ta і Nb на зразки з гарматної сталі марки 0ХН3МФА при різних технологічних параметрах (напруга, ширина та частота імпульсу, тиск робочого газу тощо).

Дослідження фізико-механічних властивостей отриманих покриттів (див. табл. 1) проведено на обладнанні Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича. Встановлено, що високі показники зносостійкості мають двошарові покриття Ta/Nb/П загальною товщиною від 20 мкм. По показникам твердості отримані покриття дещо поступаються гальванічним хромовим покриттям, але мають ближче до гарматної сталі значення модуля Юнга. Цей показник надзвичайно важливий, оскільки ствол зазнає циклічні температурні навантаження, в результаті яких можуть виникати тріщини в покритті.

В результаті проведеного дослідження можна виокремити ще декілька суттєвих переваг покриттів Ta/Nb/П, в порівнянні з покриттями із гальванічного хрому:

– отримані двошарові покриття Ta/Nb/П мають високі показники твердості, характеризуються відсутністю мікротріщин та крапельних компонентів. Останні є концентраторами напруги, що в процесі експлуатації приводить до швидкого руйнування матеріалу покриття;

– температура плавлення танталу значно перевищує аналогічну температуру як гарматної сталі-основи, так і хрому. Це в комбінації з високою хімічною стійкістю ніобію та танталу створить тепловий бар'єр та виключить явище локального проплавлення зерна сталі, які при

пострілі відриваються від поверхні і виносяться газовим потоком, збільшуючи внутрішній діаметр ствола;

– значення сили навантаження, при якій спостерігається поява тріщин для танталніобієвих покриттів майже вдвічі перевищує відповідний показник для хромових покриттів. Зменшення ймовірності появи тріщин в покритті підвищує захист гарматної сталі від агресивного впливу порохових газів;

– найкращі показники фізико-механічних властивостей мають покриття, які отримані при таких параметрах технологічного процесу: напруга на катоді U = 380±10 В; ширина імпульсу $t_{імп}$ = 32±1 мкс; частота імпульсу f = 500±5 Гц; тиск аргону P = 2±0,2 Па; напруга зміщення на підкладці $U_{зміщ.}$ = 40±5 В.

Таблиця 1.

Фізико-механічні параметри покриттів

Покриття	$H_{IT,}$ ГПа	H/E_r	E_r, ГПа	E, ГПа	$\sigma_{es,}$ ГПа	F_a	f
Ta/Nb/П	10	0,057	175	210	3,04	21	0,28
Ta/Nb/П	10-12	0,068	172	215	3,61	19	0,23
Cr гальв.	13	0,063	203	237	3,99	11	0,053
Сталь підкладка	3.3	0,018	180	210	1,01	28	0,198
де H_{IT} – твердість при автоматичному індентуванні; H/E_r –нормована твердість, E_r – приведений модуль пружності; E – модуль пружності; σ_{es} – величина межі пружності, вище якої при індентуванні починається пластична течія матеріалу; f – коефіцієнт тертя; F_a – навантаження, при якому спостерігається поява тріщин в матеріалі							

Список використаних джерел

1. Lee S., Wei R., Lin J., Chistyakov R., Schmidt D., Cipollo M., Yee F., Todaro M. New pvd technologies for new ordnance coatings. *Technical Report ARWSB-TR-12007*. 2012.
2. Коломієць В. М., Шкурат 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. *Сучасні проблеми експериментальної, теоретичної фізики та методики навчання фізики*: матеріали VII Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, молодих учених, науково-педагогічних працівників та фахівців з міжнародною участю, м.Суми, 12-14 квіт. 2021 р. / СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2021. С.37-39.

Колінько І.С.
аспірант, спеціальність «104 Фізика»,
Гончаров О.А.
Професор кафедри пм та мсс,
Левчинський А. В.
студент, спеціальність «Прикладна математика»,
Сумський державний університет,
м. Суми, Україна
ivankolinko@ukr.net

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕССІВ УТВОРЕННЯ ТА ФОРМУВАННЯ ПЛІВОК ТУГОПЛАВКИХ СПОЛУК

Плівкові покриття карбідів, нітридів і боридів перехідних металів становлять інтерес через твердість та високі температури їх плавлення, яка іноді перевищує 3000°С, та інші

властивостей [1]. На даний час для їх синтезу використовуються методи іонно-плазмового та магнетронного напилення (ВЧ та ПС). При цьому, велика кількість параметрів, які необхідно контролювати, ускладнює процес отримання плівкових наноструктур із наперед заданими фізико-механічними характеристиками.

У роботі ми проводимо аналіз структури нітридних і борідних плівок, отриманих як ВЧ так і ПС напиленням. Розмір зерен, якість текстури покриття і відповідно фізичні характеристики, такі як твердість і пружність, залежать від параметрів розпилення і додавання легуючих елементів. Виявлено деякі критично важливі для побудови реалістичної моделі процесу і проведення комп'ютерного моделювання закономірності, які в майбутньому допоможуть створювати плівки із заздалегідь відомими властивостями та підбирати оптимальні параметри напилення. В цілому було показано, що розмір зерен варіюється в середньому від 18-20 нм до 60-80 нм залежно від параметрів і способу осадження.

Аналіз структури та фізико-механічних властивостей вказаних покриттів показав, що для цього класу сполук мають місце загальні закономірності їх формування в плівковому стані, а саме, наявність структури (волокнистість) і текстури росту. Причому, для карбідних і нітридних покриттів перехідних металів існують два можливих напрямки зростання <111> і <100>, тоді як для диборидів перехідних металів таким напрямком є <0001> [2, 3]. У роботі [3] були отримані плівки $TiB_{2.4}$ методом магнетронного розпилення з сильно вираженою текстурою (0001). Також було з'ясовано, що плівки, які мають стовпчасту структуру і якісну текстуру зростання, мають найкращі фізико-механічні характеристики.

В даний час відсутня теорія росту нанокристалічних покриттів, яка б враховувала всі явища і процеси які відбуваються при формуванні покриттів. Тому кожне дослідження в цьому напрямку є актуальним. Суттєву допомогу у вивченні кінетики зростання покриттів надають методи математичного та комп'ютерного моделювання, здатні враховувати детальні атомістичні механізми в реалістичному розмірі системи (кілька десятків nm^3) і масштабах часу (від хвилин до годин) порівнянних з експериментами.

Одним з підходів до моделювання є метод Монте-Карло який дозволяє створити модель з досить великим наближенням до реального процессу напилення. Наприклад в роботі [4] був розроблений просторовий метод моделювання для покриттів TiN з решіткою типу NaCl. Більш точним є метод молекулярної динаміки, але він потребує значно більшої обраховувальної потужності від обладнання. Автори [5] використовували класичну молекулярну динаміку для вивчення дифузійних процесів на атомарному рівні. У наступних кроках роботи буде розглянута комбінація цих методів, а саме, розрахунок необхідних параметрів та моделювання первинного утворення зародків за допомогою молекулярної динаміки, та використання цих результатів для методу Монте-Карло.

Список використаних джерел

1. G. V. Samsonov and B. A. Kovenskaya, 'The Electronic Structure of Boron Compounds', in *Boron and Refractory Borides*, V. I. Matkovich, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 1977, pp. 5–18. doi: 10.1007/978-3-642-66620-9_2.
2. O. D. Pogrebnjak and O. O. Goncharov, 'Structural Features of Formed Coatings and Films of Refractory Compounds', *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, vol. 38, no. 9, pp. 1145–1166, Dec. 2016, doi: 10.15407/mfint.38.09.1145.
3. F. Kunc, J. Musil, P. H. Mayrhofer, and C. Mitterer, 'Low-stress superhard Ti□B films prepared by magnetron sputtering', *Surface and Coatings Technology*, vol. 174–175, pp. 744–753, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0257-8972(03)00425-0.
4. D. G. Sangiovanni, D. Edström, L. Hultman, V. Chirita, I. Petrov, and J. E. Greene, 'Dynamics of Ti, N, and TiN x (x = 1 – 3) admolecule transport on TiN(001) surfaces', *Phys. Rev. B*, vol. 86, no. 15, p. 155443, 2012, doi: 10.1103/PhysRevB.86.155443.
5. F. Nita, C. Mastail, and G. Abadias, 'Three-dimensional kinetic Monte Carlo simulations of cubic transition metal nitride thin film growth', *Phys. Rev. B*, vol. 93, no. 6, p. 064107, Feb. 2016, doi: 10.1103/PhysRevB.93.064107.

Котовський Г.В.
магістрант, спеціальність «014 Середня освіта (Фізика)»,
Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка,
м. Суми, Україна
kot90867@gmail.com

ПРО ВИКОРИСТАННЯ BYOD-ПІДХОДУ В НАВЧАННІ ФІЗИКИ

Реалії сьогодення такі, що молодь часто використовує власні мобільні пристрої не лише для спілкування у мережах, а й для підтримки власної освітньої діяльності. В цьому контексті тенденції залучення приватних мобільних пристроїв у освітній процес стають актуальними. Такою тенденцією є активне впровадження BYOD-підходу (Bring Your Own Device, з англ. «використовуй свій власний пристрій»), що дозволяє залучити в освітній процес часто більш потужні мобільні пристрої з передбаченим у них 3G-зв'язком, а ніж ті, що пропонує заклад загальної середньої освіти.

Вперше термін BYOD з'явився у роботі Рафаеля Баллагаса «BYOD: Bring Your Own Device» [1] і використовується з 2005 року. Вперше практику Bring Your Own Device (BYOD) почали використовувати в сфері IT ще у 2009 році, коли в компанії Intel помітили зростаючу тенденцію серед працівників приносити на робочі місця свої власні ноутбуки, планшети та смартфони з метою їх використання для роботи в корпоративній мережі. Замість того, щоб заборонити, керівники навпаки підтримали цю практику зумівши побачити перспективи економії коштів та збільшення лояльності працівників.

З масовим розповсюдженням смартфонів та планшетів ця практика поступово перейшла і в сферу освіти. Спочатку вчителі доволі упереджено ставилися до BYOD-підходу та надавали перевагу класичним формам навчання. Але останнім часом вчителі все частіше віддають перевагу саме такій формі використання комп'ютерної техніки і використовувати гаджети в освітніх цілях.

Сенс BYOD-підходу в освіті полягає в тому, що вчителі та адміністрація шкіл не забороняє, а навпаки дозволяє учням користуватися своїми мобільними пристроями на уроці і всіляко мотивують їх у цьому. Однак, існує низка проблем, пов'язаних із впровадженням та використанням даної технології. Безперечно в ході впровадження BYOD-підходу виникає питання про коректність поводження учнів зі своїми девайсами. Це питання майстерності вчителя зацікавити дитину своїм предметом, щоб в учня не виникала потреба грати в ігри чи переписуватись з друзями в месенджерах під час уроку. Щоб утримати увагу учнів, потрібно чітко продумати, які програми краще вибрати для спільної роботи в класі.

За доволі малий проміжок часу практика використання BYOD-підходу дозволила виділити деякі переваги і недоліки пов'язані з ним (рис. 1).

Існує багато варіантів використання BYOD-підходу у навчанні, зокрема, фізики. В. Сіпій вважає, що сучасні смартфони мають величезну кількість чутливих й точних датчиків, дозволяють вимірювати в режимі реального часу і зберігати в пам'ять пристрою різноманітні дані про зовнішнє середовище. Здебільшого для користувачів доступно отримання даних про рух, силу світлового і звукового потоків, але смартфон може бути використано для заміни таких фізичних приладів як секундомір, метроном, генератор звуку, стробоскоп тощо. За допомогою смартфона можна досліджувати, наприклад, гучність звуку, що створюються різними джерелами [2].

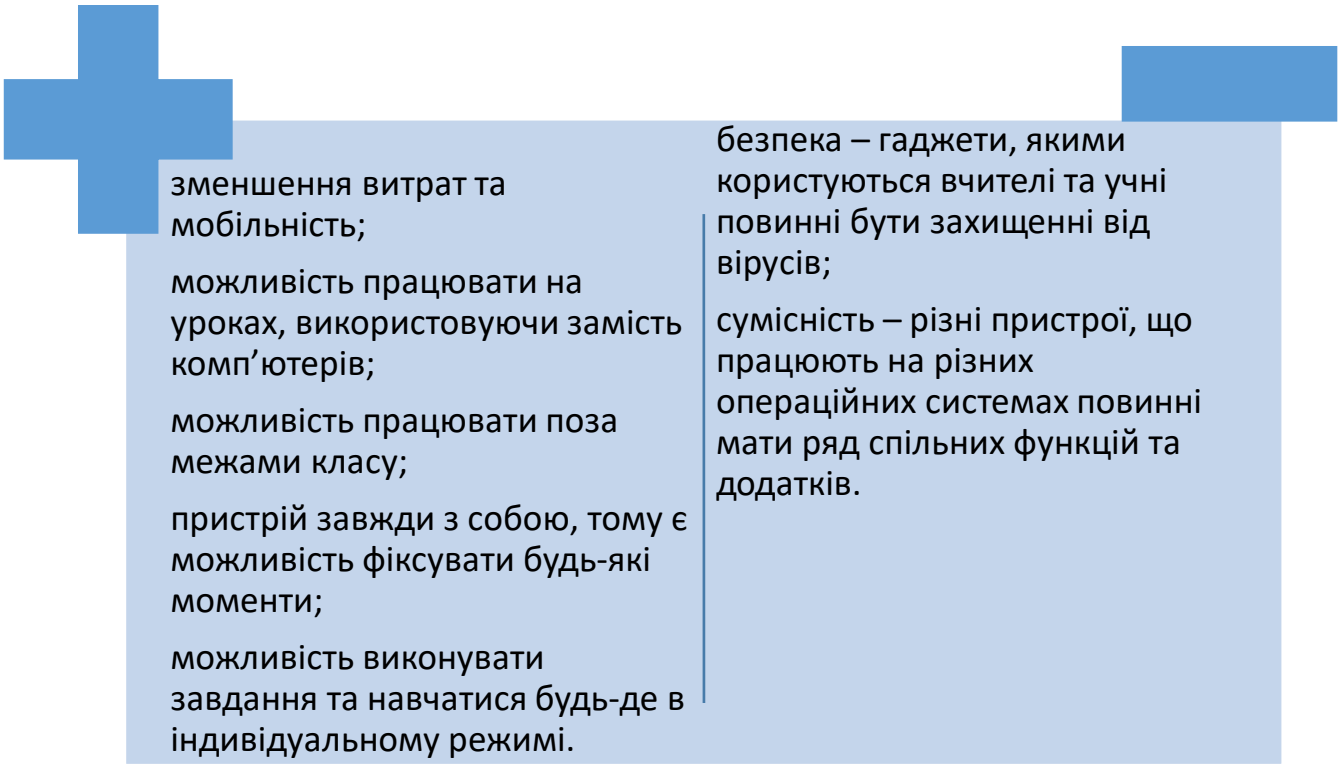


Рис.1. Переваги і недоліки використання BYOD-підходу в навчанні

Таким чином, внаслідок використання BYOD-підходу ми озброюємо школярів інструментом для фізичних досліджень не лише на уроках фізики, але й вдома, й у дорозі.

Список використаних джерел

1. Ballagas R. BYOD: Bring Your Own Device / R.Ballagas, M. Rohs, J. Sheridan, J. Borchers // UbiComp 2004 Workshop on Ubiquitous Display Environments. Nottingham, UK, September 2004.

2. Сіпій В. В. Використання принципу BYOD при вивченні фізики в старшій школі на профільному рівні // Анотовані результати науково-дослідної роботи Інституту педагогіки НАПН України за 2017 рік Інститут педагогіки НАПН України. 2017. С. 178-179. Режим доступу: http://undip.org.ua/news/library/zbirniki_detail.php?ID=6767.

Крикля С.В.
молодший науковий співробітник,
Інститут прикладної фізики НАН України,
м.Суми, Україна
s.kryklia@gmail.com

ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДУ ІОНОЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ НА БАЗІ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПРИСКОРЮВАЧА

Опромінення матеріалів високоенергетичними іонами, частіше за все призводить до утворення різноманітних дефектів в цих матеріалах. Дефекти, що виникають при цьому, змінюють властивості матеріалу мішені. Найбільш активно дані процеси протікають, як у прискорювальних комплексах наукових лабораторій, так і в атомних реакторах. Тому, дуже важливо розуміти до чого призводить утворення радіаційно індукованих дефектів в конструкційних елементах, та знаходити шляхи боротьби з цими дефектами.

Існує ціла плеяда різних методів дослідження дефектів що виникають в матеріалах. Кожен з них по своєму дозволяє визначити, ті чи інші характеристики змін матеріалів. Одним з таких методів дослідження є метод іонолюмінісценції. Метод досить цікавий, оскільки дозволяє в динаміці спостерігати зміни, що спричиняє опромінення матеріалів зарядженими частинками. Класична схема даного методу не відрізняється від інших ядерно-фізичних методів досліджень. Вона включає в себе джерело іонів, мішень для опромінення, спектрометричний тракт та електроніку для інтерпретації інформації, що надходить з мішені. В нашому випадку, в ролі детектора виступає світлочутлива пластинка фірми Toshiba, модель TCD1304[1], в поєднанні з мікроконтролером RP2040 [2]. Основне завдання контролера реалізовувати специфічні умови тактування для коректної роботи пластинки.

У даній роботі увагу зосереджено на особливостях реалізації методу іонолюмінісценції, та на основних труднощах, що виникають в процесі роботи з спектрометричним трактом.

Список використаних джерел

1. TCD1304DG Product detail [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: 1. https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/product/linear-image-sensors/detail.TCD1304DG.html.
2. Raspberry Pi Pico [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.raspberrypi.com/products/rp2040/specifications/.

Кузьменко О. С.
доктор педагогічних наук, професор
радник з гендерних питань Донецький державний університет внутрішніх справ,
провідний науковий співробітник відділу інформаційно-дидактичного моделювання
Національного центру «Мала академія наук України»
Кропивницький-Київ, Україна,
Kuzimenko12@gmail.com

СИМЕТРІЯ ТА АСИМЕТРІЯ ЯК ГЕНЕРУЮЧІ НАСКРІЗНІ ПОНЯТТЯ: АСПЕКТ STEM В УМОВАХ ТРАНСДИСЦИПЛІНАРНОСТІ

Стратегічний концепт інтеграції теорії й практики інноваційної освіти визначає тріада складових: фундаментальні дослідження, прикладні наукові розробки, практична реалізація інновацій. Проте розрив між методологічними, теоретичними й методичними знаннями має розбіжності [1]. Тому для сучасної інноватики властивою є тенденція до інтеграції цілей, змісту, функцій неології, аксіології і праксеології, що визначає цілісність процесів створення, сприйняття, оцінки, освоєння, впровадження й аналізу ефективності використання нового в педагогічній практиці на засадах STEM-освіти. У методології інноватики підкреслюється єдність трьох складових інноваційного процесу: створення, освоєння і реалізації новацій (особливо в поєдніння науки, освіти та запитів стейкголдерів). Саме такий трьохкомпонентний процес і є об'єктом вивчення в педагогічній інноватиці [2].

Фундаменталізація освіти передбачає її орієнтацію на вивчення фундаментальних законів природи і суспільства. Це зумовлює суб'єкта навчання до самостійних пошуків з розв'язання проблем в умовах невизначеності, в критичних і стресових ситуаціях, а також у тих випадках, коли здобувач освіти стикається з новими складними природними і соціальними явищами [3]. Тому вивчення наскрізних генеруючих понять у навчанні фізики на основі STEM-технологій є актуальною потребою для підготовки висококваліфікованого фахівця next generation в умовах Індустрії 5.0.

Наявність асиметрії в фізичних законах не знищує в їх змісті також існування симетрії. Вона, як і симетрія, є основою зв'язку між законами. Наприклад, асиметричність змісту

закону зростання ентропії є основою, на якій розкриваються зв'язки цього закону із законом збереження і перетворення енергії, що виражається через існування таких фізичних величин, як термодинамічні потенціали. Відомо, що закони збереження енергії та імпульсу містять в собі взаємну асиметрію: енергія – скалярна величина, імпульс – векторна величина, але між ними існує глибокий зв'язок, розкритий релятивістською теорією.

Симетрії, що виражають властивості простору і часу, відносять до геометричної форми симетрії. Прикладами геометричних симетрій є: однорідність простору та часу, ізотропність простору, просторова парність, еквівалентність інерціальних систем відліку.

Симетрії, що безпосередньо не пов'язані з властивостями простору і часу та які виражають властивості фізичних взаємодій, відносять до динамічної форми симетрії. Прикладами динамічних симетрій є симетрії електричного заряду, спіна, ізотопічного спіна та ін. До динамічних симетрій відносять симетрії внутрішніх властивостей об'єктів і процесів. Так що геометричні і динамічні симетрії можна розглядати як внутрішні і зовнішні симетрії. Форми симетрії одночасно є і формами асиметрії. Відповідно до асиметрії властивостей простору та часу відносяться до геометричних, а асиметрії властивостей взаємодії, причинності та розвитку – до динамічних.

Таким чином, вища освіта має бути фундаментальною, базуватися на сучасних досягненнях науки, здійснюватися за інноваційними STEM-технологіями в умовах трансдисциплінарності. Тому освітня діяльність у закладі вищої освіти має ґрунтуватися на таких основних постулатах, які виділено в нашому дослідженні: 1) відповідність освіти потребам соціально-економічного розвитку суспільства; 2) забезпечення інтелектуального розвитку особистості, оволодіння нею ефективними методами самостійної пізнавальної діяльності.

Список використаних джерел

1. Чернецький І., Поліхун Н., Сліпухіна І. Місце STEM-технології навчання в освітній парадигмі XXI століття. *Наукові записки Малої академії наук України: зб. наук. праць.* Київ : Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2017. Вип.9. С. 50–62.

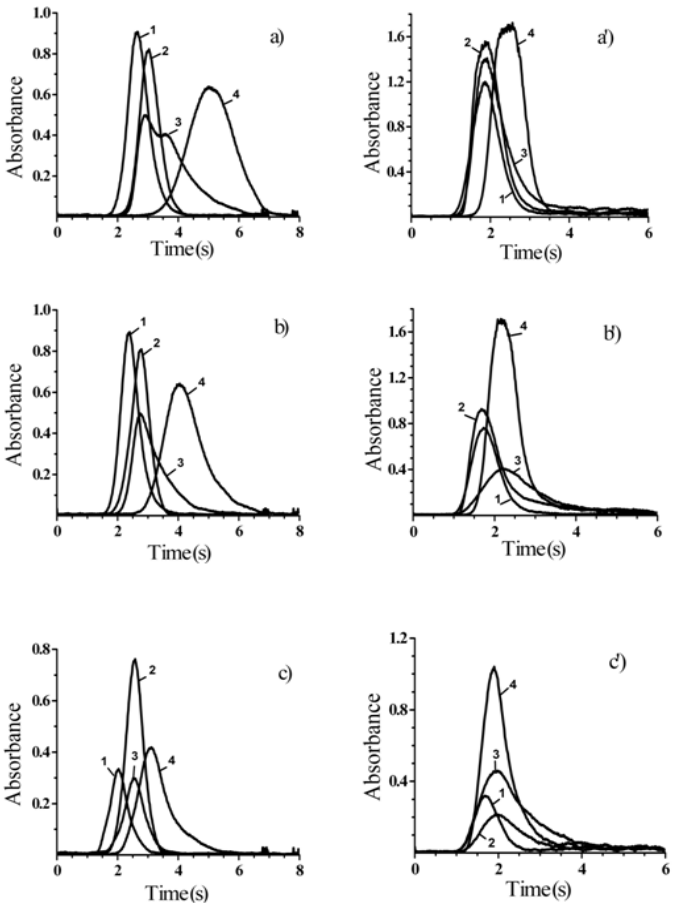
2. Іваницький О. І., ткаченко С. П. Технології навчання фізики : теоретико-методичні засади : навч. посібник. Запоріжжя : ЗНУ, 2010. 254 с.

3. Гончаренко С. У. Принцип фундаменталізації освіти. Наукові записки. Серія : Педагогічні науки. 2004. Вип.55. С. 3–8.

Кулик О.М.
молодший науковий співробітник,
Інститут прикладної фізики НАН України,
м. Суми, Україна
caine@ipflab.sumy.ua

ВПЛИВ ХІМІЧНИХ МОДИФІКАТОРІВ НА АНАЛІТИЧНИЙ ТЕРМІН ДІЇ ГРАФІТОВИХ ПЕЧЕЙ АТОМНО-АБСОРБЦІЙНОГО СПЕКТРОМЕТРА

Однією з головних експлуатаційних характеристик для атомно-абсорбційних спектрометрів (ААС) з електротермічним атомізатором (ЕТА), є аналітичний термін дії (АТД) їх атомізувального осередка – графітової печі (ГП). Прийнято вважати, що АТД – це проміжок у ряді циклів атомізації, де інтегральна абсорбція становить ≥80% від максимального значення [1]. Тобто, згідно з правилом, якщо інтенсивність аналітичного сигналу (АС) опускається нижче вказаної межі, необхідне проведення перекалібровки приладу або заміна зношеної ГП на нову. Це тягне за собою тимчасове припинення



вимірювань і, як наслідок, додаткову втрату часу. Тому, щоб заздалегідь врахувати згаданий фактор, виникає необхідність займатися проблемою зношуваності графітових елементів атомізатора ААС з ЕТА і обов'язковим здійсненням контролю значень величини АС [2].

Відомо, що в процесі зношування залежність температури нагрівання ГП від часу змінюється. Це явище пов'язуєся зі зменшенням маси ГП внаслідок втрати вуглецевого матеріалу, зокрема в місцях з найменшою площею перерізу стінки [3-5]. Відмінність реальної температури від заданої може негативно позначатися на правильності і відтворюваності результатів вимірювань.

Зношування ГП відбувається внаслідок дії багатьох факторів, зокрема, об'єму і складу проби [6]. Застосування хімічних модифікаторів (ХМ), зазвичай, змінює як кількість, так і склад дозованої речовини, що може призводити до зменшення строку служби ГП [1, 4, 7] з яким пов'язаний АТД. За механізмом дії ХМ поділяють на перманентні, які після взаємодії зі стінкою ГП утворюють тугоплавкі карбіди (наприклад, сполуки вольфраму чи цирконію) та ін., такі як метали платинової групи (включно з паладієм). Враховуючи вищезгадане, додавання ХМ до проби повинно змінювати параметри АС.

У нашому випадку аналітами вибрані Ag (a, b, c) і Cu (a′, b′, c′), де криві відповідають стану печі (нова (a, a′), АТД (b, b′), поломка (c, c′)): 1 – без модифікації; 2 – модифікованої W; 3 – Zr; 4 – Pd.

Додавання ХМ збільшує об'єм проби і кількість речовин, що здатні реагувати зі стінкою ГП. Обидва фактори сприяють прискореній деградації ГП та більш ранньому виходу її з ладу. Незалежно від виконання своїх прямих функцій, ХМ, вірогідно, зменшують АТД ГП. Це стосується, як металів платинової групи, так і перманентних модифікаторів на основі вольфраму і цирконію.

Загалом, тривалість АТД для кожного з аналітів чи ХМ, змінюється по різному. За час АТД, максимум АС срібла встигає значно зміститися у напрямку початку координат, а у міді цей процес малопомітний; не модифіковані і модифіковані вольфрамом АС мають найменше відмінностей; після модифікації цирконієм виходять занижені сигнали, що часто мають більше одного піка; при модифікації паладієм атомізація розпочинається зі значущим запізненням.

Список використаних джерел

1. Ortner H.M.; Rohr U.; Schlemmer G.; et al. Corrosion of transversely heated tubes by iron and lanthanum matrices. Spectrochim. Acta, B. 2002, 57, 243-260.

2. Rogul'skii Yu.V.; Bugai A.N.; Kulik A.N. Influence of the porosity of the surface of a graphite furnace on the atomithation of a sample. J. Appl. Spectrosc. 2004, 71, 282-287.

3. Slavin W.; Myers S.A.; Manning D.C. Reduction of temperature variation in the atomic absorption

graphite furnace. Anal. Chim. Acta. 1980, 117, 267-273.
4. Frech W. Recent developments in atomizers of electrothermal atomic absorption spectrometry. Fres. J. Anal. Chem. 1996, 355, 475-486.
5. Kulik A.N.; Bugai A.N.; Rogul'skii Yu.V. Effect of wear of the atomic-absorption spectrometer graphite furnace on the analytical zone temperature. J. Eng. Phys. Thermophys. 2007, 80, 159-165.
6. Kulik A.N.; Rogulsky Yu.V.; Buhay O.M.; et al. Effect of graphite furnace degradation on atomic absorption signals. J. Appl. Spectrosc. 2020, 87, 601-607.
7. Castro M.A.; Aller A.J.; Faulds K.; et al. Study of the effect of nitric acid and metal-based chemical modifiers on graphite platform surfaces by Raman spectrometry. J. Anal. At. Spectrom., 24, (2009) 1044-1050

Кульментьєв О. І.
доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Інститут прикладної фізики НАН України,
м.Суми, Україна,
kulmentev@ukr.net

МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ НАНОКЛАСТЕРІВ ДЛЯ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У РАМКАХ БАГАТОРІВНЕВОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У зв'язку зі зростанням населення, підвищенням енергоспоживання на одну людину та проблемами збереження навколишнього середовища особливої актуальності набувають завдання розвитку безвуглецевої енергетики, зокрема, реакторів поділу та водневої енергетики. При цьому в результаті збільшення планованих термінів експлуатації та погіршення параметрів робочого середовища (підвищення температури, ускладнення механічних навантажень, хімічної агресивності тощо) єдиним варіантом вибору нових матеріалів або прогнозування поведінки вже існуючих залишається багаторівневе комп'ютерне моделювання.

Для ядерної енергетики (передбачення термінів безпечної експлуатації корпусів реакторів) цей підхід реалізується у проекті PERFORM 60 (Рис.1). Для водневої енергетики аналогічний підхід може бути реалізований у задачі вибору оптимального нанокаталізатора для кожного з окремих етапів – отримання, зберігання та використання водню [1]. Конкретно пропонована схема може складатися із серії послідовних кроків.

Крок 1. На підставі попереднього досвіду та наявних експериментальних даних задається число та тип атомів, що становлять нанокластер, його розмір і форма, температура середовища, а також граничні умови, що імітують взаємодію кластера з підкладкою.

Крок 2. У рамках методу "первопринципної молекулярної динаміки" [2] протягом заданого числа кроків моделюється динамічна еволюція системи атомів, що формують кластер, і після цього частинки фіксуються.

Крок 3. Далі на підставі розробленого автором раніше методу [3] ідентифікації та аналізу поверхні компактних утворень вимірюємо форму кластера. Цей метод заснований на уявленні про кочення поверхнею пробної сфери і результатом його застосування є тривимірний дійсний вектор – дескриптор форми кластера.

Оскільки згідно визначення, форма кластера характеризує його властивості як цілого, то в результаті послідовного застосування кроків 2 – 3 може бути виміряна динамічна еволюція кластера та його колективних мод.

Крок 4. Використовуючи традиційний вейвлет-аналіз на основі тимчасової еволюції дескриптора вектора форми, можна виділити локальні особливості динамічних мод кластера, і його енергії як цілого.

Крок 5. Цілеспрямовано змінюємо всі початкові характеристики кластера, які задаються на Кроку 1, повертається на Крок 2.

Запропонована схема у багатьох відношеннях подібна до тієї, що показана на рис.1. Вона також є послідовною та багаторівневою, проте кількість рівнів у ній набагато менша і дорівнює 3. Дійсно, в нанокластерах фізично відсутні дислокації, і все більш високі рівні моделювання стають не потрібними.

Крім того, деякі з нижніх рівнів вже узгоджені раніше, і тому є підстави очікувати, що схема в цілому буде самоузгодженою, а використовуючи обчислювальні можливості, що постійно зростають, сучасних ЕОМ, можна буде отримати корисні передбачення.

В каком-то смысле предлагаемая схема подобна существующему в химии подходу по выбору оптимального катализатора, только теперь эксперимент предполагается проводить не на экспериментальном оборудовании в лаборатории, а на компьютере.

У якомусь сенсі пропонована схема подібна до існуючого в хімії підходу на вибір оптимального каталізатора, тільки тепер експеримент передбачається проводити не на експериментальному обладнанні в лабораторії, а на комп'ютері.

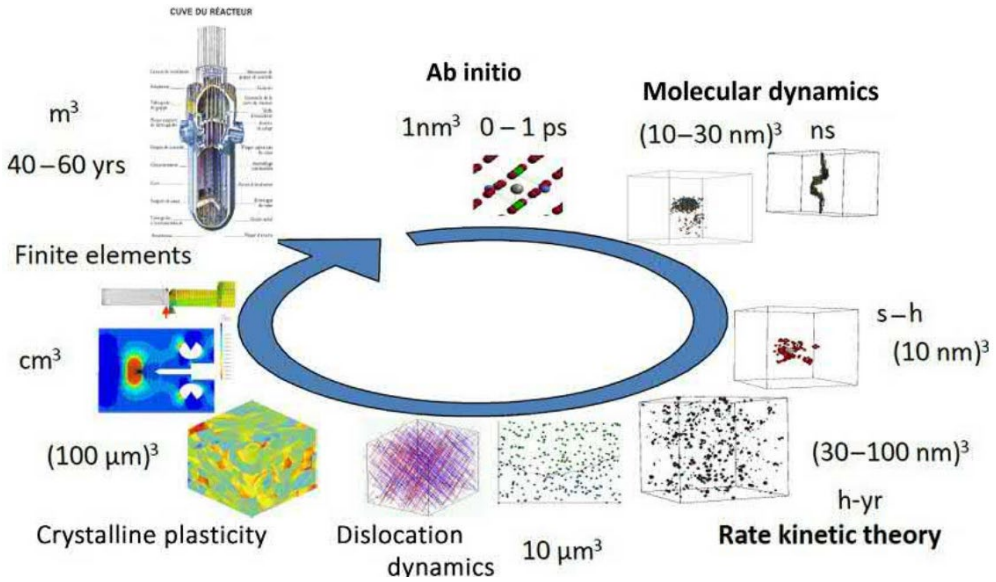


Рис.1. Схема багаторівневого моделювання задачі вивчення процесів руйнування корпусних сталей реактора. Ілюстрація підходу, використаного у проекті European Commission PERFORM 60.

Список використаних джерел

1. Liu L., Corma A. Metal catalysts for heterogeneous catalyses: From single atoms to nanoclusters and nanoparticles // Chem. Rev. – 2018. – V. 118. – P.4981 – 5079.

2. Кульментьев А.И. Измерение интегральных характеристик атомных кластеров при компьютерном моделировании. // Математическое моделирование. – 2012. – Т.24, №3. – С.97 – 112.

3. Truhlar D.G. *Ab initio* molecular dynamics: Basic theory and advanced methods. // Physics Today. – 2010. – **63**, N3. – P.54; doi: 10.1063/1.3366243.

4. Kim H., Melhem H. Damage detection of structures by wavelet analysis. // Engineer. Structures. – 2004. – **26**. – P. 347 – 362.

Лебединська Ю.С.
інженер ІІ категорії,
Лебединський С.О.
кандидат фізико-математичних наук., науковий співробітник,
Холодов Р.І.
доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України,
Інститут прикладної фізики НАН України,
м. Суми, Україна
lebos8@gmail.com

ПОЛЬОВА ЕЛЕКТРОННА ЕМІСЯ З «РЕАЛЬНОЇ» ПОВЕРХНІ МЕТАЛУ

У звичайних лінійних прискорювачах заряджені частинки прискорюються електромагнітною хвилею, яка рухається синхронно з ними і створюється за допомогою

потужного ВЧ-випромінювання з напруженістю поля в межах 20...50 МВ/м. Технічним обмеженням для досягнення необхідних високих прискорювальних градієнтів є виникнення електричного пробою, що призводить до падіння прискорювальної напруги та пошкодження конструктивних елементів самого прискорювача. Оскільки напруженість електричного поля повинна бути менше порогу пробою, для прискорення частинок до енергій в сотні ГеВ потрібні багато кілометрів прискорювальних структур. Одним з основних напрямків розвитку прискорювальної техніки є підвищення темпу прискорення до 100 МВ/м, як, наприклад, в проєктах Compact LInear Collider (CLIC), International Linear Collider (ILC), що дозволить зменшити лінійні розміри сучасних електронних прискорювачів, зробити їх більш компактними та досягти рекордних енергій прискорення пучків заряджених частинок (порядку декількох ТеВ). Такі прискорювальні градієнти дозволять провести дослідження з вимірювання маси, спіну та сили взаємодії бозона Хіггса, досліджувати нові енергетичні діапазони, дослідити найлегші суперсиметричні частинки, можливі кандидати на темну матерію. Також це дасть можливість створити мініатюрний лінійний прискорювач довжиною в декілька метрів, придатний для застосування в медичній галузі.

Оскільки кожен пробій призводить до втрати щільності пучка заряджених частинок та пошкодження поверхні матеріалу, досліджуються різні методи підвищення стійкості до високоградієнтного пробою прискорювальної структури. Одним із способів усунення проблеми високовакуумних високоградієнтних пробоїв є зменшення густини струму польової емісії. Оскільки емісійний струм сильно залежить від підсилення напруженості електричного поля на неоднорідностях на поверхні катоду, тому для коректного описання процесу польової електронної емісії необхідно враховувати вплив морфології поверхні катоду та вплив точкових дефектів приповерхневого шару.

Лобас Д.І.
магістрант, спеціальність «014 Середня освіта (Фізика)»,
Сумський державний педагогічний
університет імені А. С. Макаренка,
м. Суми, Україна
lobasd293@gmail.com

МІСЦЕ ФІЗИКИ В СИСТЕМІ ЗАГАЛЬНООСВІТНІХ ПРЕДМЕТІВ

Роль фізичного знання в житті людини і суспільному розвитку важко переоцінити. Сучасна фізика є джерелом знань про сучасний світ, основою науково-технічного прогресу і водночас важливий компонент загальнолюдської культури. Фізика є фундаментальною наукою. Її експериментальна база та теорії стали основою для розвитку астрономії, біології, хімії тощо. Водночас стрімкий розвиток теоретичної, експериментальної та прикладної фізичної науки створили можливості для розробки інформаційних та медично-біологічних технологій, розвитку військово-промислового комплексу та енергетики. Фізика як навчальний предмет має відображати рівень досягнень фізики як науки. Саме це визначає місце фізики в системі загальноосвітніх предметів, які включені до шкільної програми. З урахуванням компетентнісного підходу до освітнього процесу можна стверджувати, що на сучасному етапі вже не актуальними стають формальні знання та уміння і відтворення вивченого на репродуктивному рівні. Принциповим стає розуміння суті фізичних процесів, у тому числі можливих негативних наслідків у разі некваліфікованого, некоректного або

безвідповідального використання результатів наукових і технічних досягнень. Велике значення гуманітарного, світоглядного та виховного аспекту фізичних знань для фахівців усіх, у тому числі гуманітарних галузей, а також безпосередній зв'язок між рівнем технологічної грамотності населення і техногенною безпекою та обороноздатності країни визначає потребу та рівень вивчення фізики у старшій школі.

Навчання фізики в основній школі відбувається на рівні певних експериментів та явищ. Фізика у старшій школі зорієнтована на навчання на рівні теорій. Будь-яке знання по своїй природі - це система, яка складається з певних елементів, що пов'язані між собою і розвиваються. Вищим результатом будь-якої системи є фундаментальна теорія. Ознакою фізичної теорії є замкненість систем понять, що дають вичерпні відповіді на певне коло питань. Формування та розвиток в учнів старшої школи системних фундаментальних знань є основною метою навчання фізики.

Марченко О.А.
викладач фізики та астрономії
ДНЗ «Черкаське вище професійне училище»
м.Черкаси, Україна
oksana_ostashevska@ukr.net

ЗАСТОСУВАННЯ ТВОРЧОЇ СКЛАДОВОЇ НА УРОКАХ ФІЗИКИ ДЛЯ РОЗВИТКУ ПРЕДМЕТНИХ ТА КЛЮЧОВИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ УЧНІВ

Фізика займає особливе місце серед загальноосвітніх дисциплін. Вона створює уявлення про наукову картину світу, дозволяє розвивати творчі здібності учнів, формує їх світогляд і сприяє розвитку особистості.

STEAM (Science, Technology, Engineering, Art, Mathematics) – сучасний та популярний освітній напрям, який є інтеграцією природничих наук та технологій, технічної творчості та математики. Творчість «Art» включає в себе творче мислення та сприйняття, опанування основами моделювання, включаючи технічне проектування. Завдяки цьому освітній процес стає більш різноманітним та насиченим, а це дозволяє налаштувати учнів до креативного розв'язку поставлених задач.

Згідно навчальної програми в системі ЗП(ПТ)О курс фізики дає широкі можливості для розвитку творчого мислення та здібностей у здобувачів освіти. Тому відмовлятися від «Art» − складової при викладанні фізики недоречно. Творчий підхід формує більшу мотивацію в учнів та стійкий пізнавальний інтерес до предмету [1].

Хочу зазначити, що творчість завжди є тою рушійною силою, яка здатна розв'язати найскладніші задачі, не зациклюючись на проблемі. У своїй педагогічній діяльності я реалізую творчу складову STEAM освіти через:

- ✓ творчі конкурси для учнів;
- ✓ робототехніку та приладобудування;
- ✓ комп`ютерне моделювання фізичних процесів.

До різноманітних творчих конкурсів я залучаю здобувачів освіти, які вміють мислити творчо, розв'язувати нестандартні задачі та використовувати сучасні інформаційні технології. Нижче наведені конкурси в яких мої вихованці регулярно приймають участь.

Всеукраїнський творчий конкурс «Space Art Chellenge» від Ноосфери розрахований на учнів, які мають здібності до малювання, а також цікавляться астрономією. Це дозволяє їм втілювати свої комічні фантазії в малюнках. Щороку тематика конкурсу є різною, наприклад, «Супутник Землі», «Політ в Космос», «Україна космічна». Для того, щоб створити малюнок заданої тематики учні займаються пошуково-дослідницькою діяльністю, збирають наукові факти, переглядають відео, аналізують отриману інформацію [2].

Всеукраїнський конкурс «Літературний Всесвіт» від Національного центру аерокосмічної освіти молоді імені Макарова **має 3 напрямки:**

- ✓ **нова космічна казка** (казки та фантазії на космічну тематику);
- ✓ вірш (опис у віршованій формі своїх космічних фантазій);
- ✓ есе (написати свої роздуми на задані теми, спробувати знайти вирішення глобальних проблем людства, висловити власну думку).

Для шанувальників астрономічної фотографії щороку проводиться всеукраїнський конкурс «Sweet Dream». Юні фотографи - дослідники змагаються у категоріях: далекий космос, сонячна система, астрономічний пейзаж. За умовами конкурсу до фотографій та параметрів зйомки є вимоги [3].

Технічна творчість являє собою цілеспрямований процес навчання і розвиток творчих здібностей учнів в результаті чого створюються матеріальні **технічні об'єкти з ознаками корисності і новизни. Робототехніка та приладобудування об'єднує програмування, алгоритміку, логіку, механіку, математику, проектну діяльність та фізику.**

Це сприяє формуванню в учнів стійкого пізнаваного інтересу до техніки; розвитку технічного мислення, схильностей до раціоналізаторства та винахідництва.

Комп'ютерне моделювання дає можливість за допомогою імітаційної моделі (комп'ютерних симуляторів) виконувати фізичні експерименти. В кожну модель закладається математичний апарат, який дає можливість отримувати значення фізичних величин близькі до реальних, що в свою чергу, дає змогу отримувати правильні результати та робити відповідні висновки про фізичний зміст явища чи процесу [4].

Отже, застосування творчої складової STEAM освіти при викладанні фізики та астрономії є необхідним важелем для мотивації та формування стійкого пізнавального інтересу учнів.

Список використаних джерел

1. Блог вчителя фізики Марченко О.А. «Квант знань» [Електронний ресурс]. Режим доступу: oksanaostashevska.wixsite.com/physicblog
2. Конкурс малюнку від Noosphere Space Art Challenge Режим доступу: https://noosphereglobal.com/uk/noosphere-space-art-challenge-2022-vazhlive-rishennya/
3. Проекти та конкурси НЦАОМ. Всеукраїнські конкурси. Режим доступу: https://unaec.dp.ua/projects/litvsesvit.htm
4. Комп'ютерний експеримент на уроках фізики. Освітній портал Урок-UA [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://urok-ua.com/kompyuterniy-eksperiment-na-urokah-fiziki/

Мей Ліхун
магістрант, спеціальність «014 Середня освіта (Фізика)»,
Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка,
м. Суми, Україна
mlihun@gmail.com

ВИКОРИСТАННЯ НАВЧАЛЬНИХ ВІДЕО ІСТОРИЧНОГО ЗМІСТУ НА УРОКАХ ФІЗИКИ

Реалії сьогодення такі, що більшість учнів вважають фізику дуже складною, незрозумілою та не важливою для їх життя наукою. Один із можливих шляхів подолання такого непорозуміння – використання елементів історизму на уроках фізики, причому неззаперечно у сучасних формах, які притаманні поколінню Z.

В той же час спостерігається суперечність між змістом підручників та відсутністю можливості включати достатньо історичних відомостей під час проведення уроків фізики. Історичний матеріал в більшості підручників виноситься на самостійне опрацювання

учнями і не передбачає перевірки вчителем, тобто для учня він не є обов'язковим. З іншого боку, навчальні плани в школі вже зараз перевантажені і немає можливості виділення додаткового часу для вивчення фізики на уроках за розкладом без шкоди для інших дисциплін. Через це, одним із можливих шляхів вирішення зазначеної суперечності є урізноманітнення форм роботи із історичним матеріалом на уроках фізики з метою інтенсифікації освітнього процесу.

Сучасними та ефективними формами використання історичного матеріалу на уроках фізики, на нашу думку, є наступні (рис. 1).

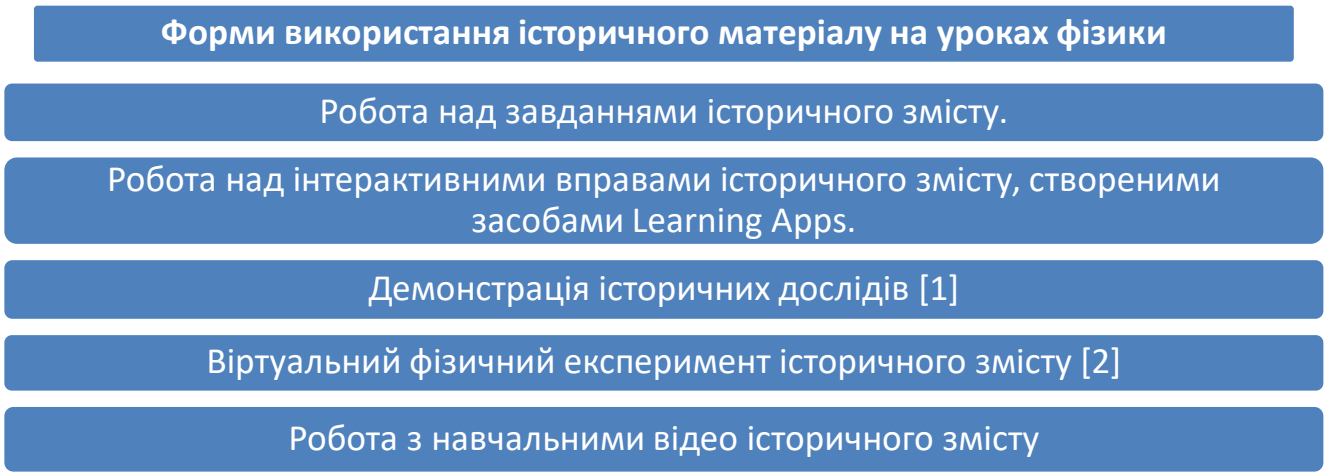


Рис.1. Форми використання історичного матеріалу на уроках фізики

Робота з навчальними відео історичного змісту на уроках фізики є достатньо ефективним засобом навчання. Зупинимося детальніше саме на такому виді роботи. Навчальні фільми з історії фізики для школярів здатні допомогти засвоїти певні теми. Вони можуть бути присвячені як експериментам, вивченню різних проблем, так і біографіям вчених-фізиків та історії їх відкриттів.

Навчальні відео історичного змісту – це не тільки документальні фільми про вчених-фізиків та їх відкриття, але і художні фільми, які будуть цікаві кожному учню, перегляд яких можна використовувати у якості домашнього завдання перед уроком з певної теми. Головне, щоб фільм відповідав віку учнів та темам, що вивчаються.

Наведемо низку фільмів, які можна використовувати з метою ознайомлення учнів з історією фізики (матеріал взято із сайту альтернативної освіти [3]).

1. Стівен Гокінг. Теорія всього (Велика Британія, 2014,) та Хокінг (Велика Британія, 2014). Фільми про всесвітньо відомого фізика Стівена Гокінга.

2. Небезпечний елемент (США, 2020). Фільм про життя і дослідження Марії Склодовської-Кюрі, про те, як вона відкрила радій і полоній.

4. Тесла (США, 2020) та Війна струмів (США, 2017). Фільми про суперництво Ніколи Тесли з Томасом Едісоном.

5. Інтерстеллар (США, Велика Британія, Канада, 2014). Фільм удостоївся похвали за доступне пояснення загальної теорії відносності. Статті про освітню цінність «Інтерстеллара» вийшли в журналах American Journal of Physics та Classical and Quantum Gravity. Всі фізичні явища в голлівудському фільмі були піддані ретельному аналізу, вчені рекомендують показувати фільм на уроках фізики для пояснення теорії відносності.

6. Геній (2017, серіал, США). Серіал про те, як Альберт Ейнштейн в молодості не міг отримати роботу викладача, і як він прийшов до теорії відносності.

При роботі з навчальними відео історичного змісту в навчанні фізики важливо пам’ятати, що відео – це лише доповнення, а не заміна експериментів; науково-популярні фільми можуть містити помилки, тому важливо вивчати дітей критично сприймати інформацію; фільми – це не заміна уроку, вони тільки створюють ґрунт для обговорення; дискусії зі школярами – це невід’ємна частина роботи з навчальними відео.

Список використаних джерел

1. Величко, С.П. (1998). Розвиток системи навчального експерименту та обладнання з фізики у середній школі. Кіровоград. 302с.

2. Головко, М. В., Крижановський, С. Ю., Мацюк, В. М. (2015). Моделювання віртуального фізичного експерименту для систем дистанційного навчання в загальноосвітній і вищій педагогічній школах. Інформаційні технології і засоби навчання, 47(3). 36-48.

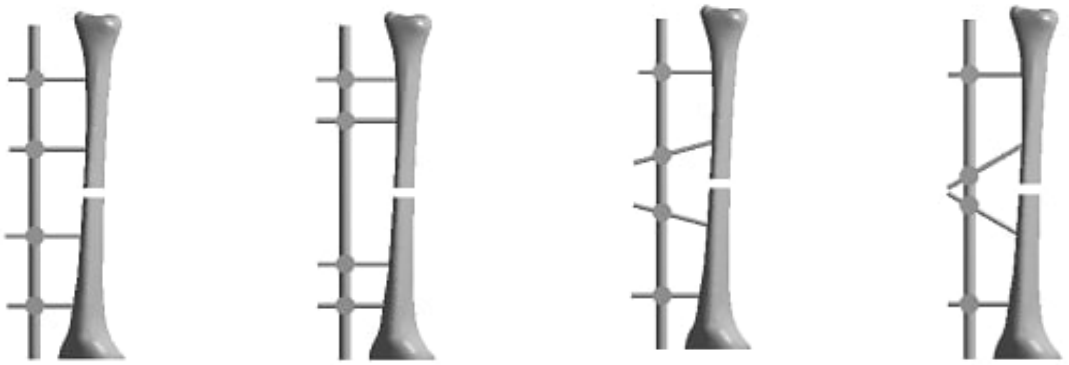
3. Мисліцька, Н.А., Бутківська, С.В. (2012). Форми реалізації принципу історизму під час вивчення фізики. Наукові записки. Серія: Педагогічні науки. 108(1). 83-87.

4. «Освіта Нова». Режим доступу: https://osvitanova.com.ua/posts/4382-12-filmiv-pro-fizyku-i-fizykiv.

Моргун О. І.
студент, спеціальність «131 Прикладна механіка»
Діденко Р. П.
студент, спеціальність «131 Прикладна механіка»
Мусієнко О. С.
асистент
Фам Д. К.
кандидат технічних наук, доцент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна
alexmorgun2003@gmail.com

РОЗРОБКА СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ФІКСАТОРА ВЕЛИКОГОМІЛКОВОЇ КІСТКИ

При вогнепальних пошкодженнях кісток первинним методом хірургічного лікування є остеосинтез за допомогою стержневого апарату зовнішньої фіксації (СтАЗФ). Але встановлювати СтАЗФ за схемою, що використовується для звичайного (не вогнепального) перелому кістки, недопустимо, оскільки стрижні, що знаходяться поблизу місця перелому, потраплятимуть у пошкоджену кісткову тканину. Проведення натурних експериментальних досліджень по визначенню жорсткості систем є складним та трудомістким, тому було проведено моделювання процесів деформування систем «великогомілкова кістка – апарат зовнішньої фіксації» з різними варіантами розташуваннями стержнів сучасними комп’ютерними засобами з використанням CAD/CAE методів для оцінки напружено-деформованого стану біомеханічної системи. Розглядалось 4 варіанти розміщення стержнів (рис. 1) досліджуваної моделі.

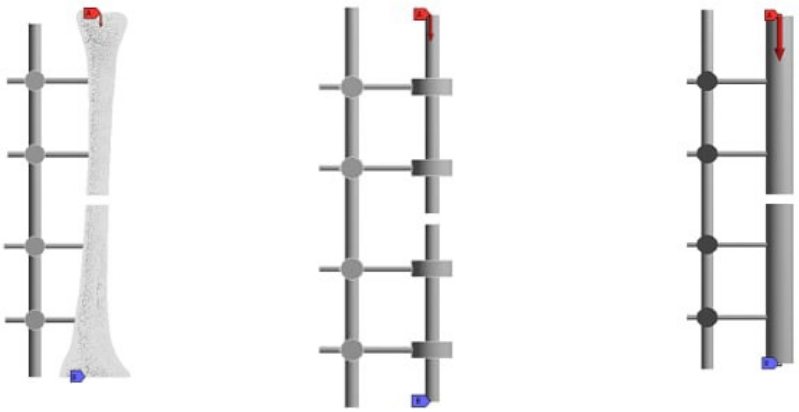


а) б) в) г)

Рис. 1. Схеми розташування стержнів, де а) - стандартна, б) - з віддаленими стержнями, в) - під кутом 75° та г) - під кутом 60°.

Для визначення можливості спрощення та пришвидшення розрахунків було запропоновано використання спрощеної геометрії для конструкції фіксатора великогомілкової кістки при створенні його скінченно-елементної моделі. Тому при чисельному моделюванні розрахунки проводили в 3 постановках: об'ємній (рис. 2а), стержневій (рис. 2б) і балочній (рис. 2в).

Розрахунки були проведені методом скінченних елементів за допомогою програмного пакета ANSYS Workbench. Дослідження проводились при стиску. Крайові умови вказані на рис. 2.



а) б) в)

Рис. 2. Схеми закріплення та навантаження моделей при стиску

Порівняння жорсткостей систем при різному розташуванні стрижнів з використанням різних постановках у відносних координатах наведені на рис.3.

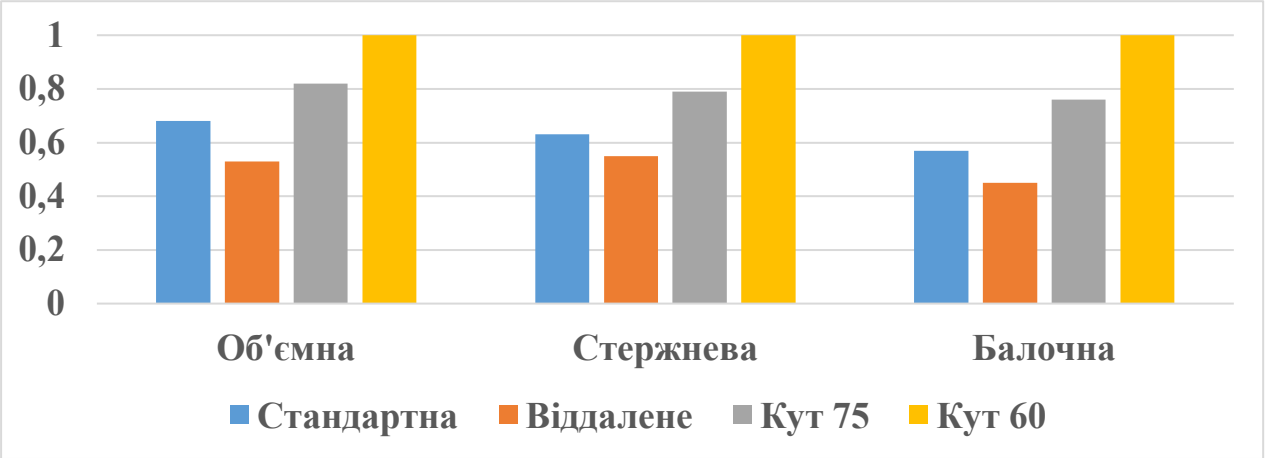


Рис. 3. Діаграма порівняння жорсткості систем при стиску, побудована у в відносних координатах

За результатами дослідження, показано, що представлені в роботі скінченно-елементні моделі досліджуваних систем, не зважаючи на введені спрощення, мають схожу здатність прогнозувати якісне порівняння жорсткості. Це в свою чергу дозволяє зробити висновок, щодо можливості використання більш простої математичної моделі для подальших досліджень з більшою ефективністю

Мусієнко І. І.
молодший науковий співробітник,
Інститут прикладної фізики НАН України,
м. Суми
igormusienko2017@gmail.com

ГУСТИНА СТРУМУ ПОЛЬОВОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ ЕМІСІЇ З ПОВЕРХНІ МЕТАЛУ З ВРАХУВАННЯМ НАЯВНОСТІ НАНОСКОПІЧНИХ ВІСТРЬ

Задача регулювання величини струму польової емісії є актуальною для усунення високовакуумних високоградієнтних пробоїв у складових частинах сучасних прискорювачів. Польова емісія є однією з основних причин, що призводить до втрати електроізоляційних властивостей міжелектродного вакуумного проміжку.

Метою дослідження є обчислення густини струму польової емісії з поверхні високоградієнтних прискорювальних структур з врахуванням наявності вістрь наноскопічного масштабу на поверхні міді.

Напруженість електричного поля поблизу металевого вістря значно перевищує середнє значення цього параметра для сумарної поверхні катода [1, с. 130]. Тому узагальнений коефіцієнт підсилення β прикладеного електричного поля перпендикулярно до поверхні металу для струму польової електронної емісії знаходять за формулою:

$$E = \beta E_0, \qquad (1)$$

де E_0 – прикладена напруженість електричного поля до плоскої поверхні металу; E – підсилена нанорозмірними нерівностями поверхні металу напруженість електричного поля [1, с. 131].

У випадку наявності двох нановістрь на поверхні металу введемо величини: E_1, E_2 – локальні напруженості електричного поля поблизу нановістрь; j_1, j_2 – густини струму польової емісії з першого і другого вістрь відповідно; $S_1=2\pi r_1^2$, $S_2=2\pi r_2^2$ – площі поверхонь нановістрь напівсферичної форми відповідно; r_1, r_2 – відповідні радіуси. Вістря на поверхні

металу наближено вважаємо напівсферичної форми й розглядаємо, що польова емісія виникає для цього виду емітерів нанометрового масштабу. Взаємним впливом густин струмів з вістрь будемо нехтувати тому, що вістря знаходяться на відстані $d>3\cdot r_{max}$ один від одного (r_{max} – найбільший радіус вістря).

Введено позначення: $j_1 = A\cdot E_1^2 \exp\left(-B/\left(eE_1\right)\right)$; $j_2 = A\cdot E_2^2 \exp\left(-B/\left(eE_2\right)\right)$; $j_i = E_i^2 \exp\left(-B/\left(eE_i\right)\right)$; A, B=const; e – заряд електрона; i – порядковий номер вістря; $M = \left(1/\left(E_0^2\left(r_1^2+r_2^2\right)\right)\right)\cdot\left(E_1^2 r_1^2 \exp\left(-B/\left(eE_1\right)\right)+E_2^2 r_2^2 \exp\left(-B/\left(eE_2\right)\right)\right)$.

Прирівняємо $j=j_{F\text{-}N}(\beta_2 E_0)$ для знаходження β_2:

$$\beta_2 = B/\left(2eE_0\cdot LambertW\left(B/\left(2\sqrt{M}eE_0\right)\right)\right), \qquad (2)$$

де *LambertW(x)* – обернена функція до $f(w)=w\exp(w)$, $j=\left(j_1 r_1^2+j_2 r_2^2\right)/\left(r_1^2+r_2^2\right)$, $j_{F\text{-}N}$ – густина струму польової емісії в статті [2, с. 179].

З Рис. 1 слідує, що для напруженості електричного поля E є $[10^9;10^{10}]$ В/м коефіцієнт підсилення β_2 у випадку двох вістрь дорівнює 221,5.

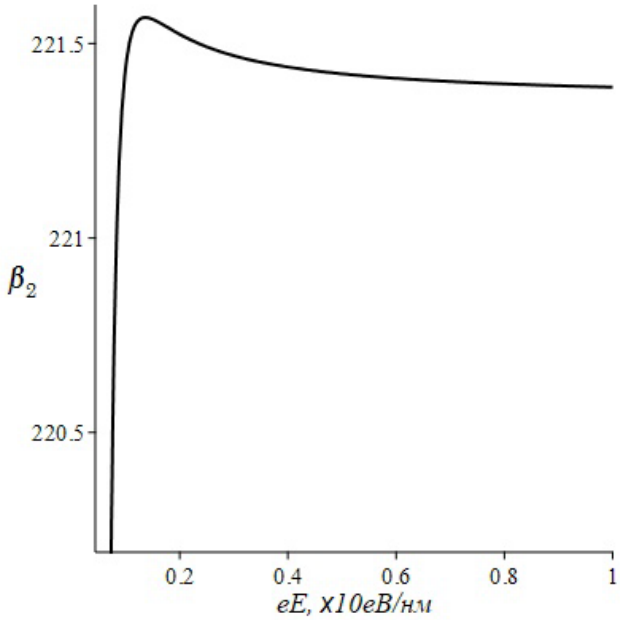


Рис. 1. Графічна залежність коефіцієнта підсилення від величини e·E

У дослідженні знайдено узагальнений коефіцієнт підсилення β електричного поля з напруженістю E_0 в задачі польової електронної емісії з поверхні металу з врахуванням N вістрь наноскопічного масштабу. Використано позначення: $N = n\cdot S_{катода}$; $S_{катода}$ – площа поверхні катода; n – концентрація вістрь на поверхні катода на квадратну одиницю поверхні; J – густина струму з N вістрь наноскопічного масштабу. З умови $J=j_{F\text{-}N}(\beta E_0)$:

$$\left(1/E_0^2\right)\cdot\left(\left(\sum_{i=1}^{N} j_i S_i\right)/\left(\sum_{i=1}^{N} S_i\right)\right) = \beta^2 \exp\left(-B/\left(e\beta E_0\right)\right), \qquad (3)$$

знайдено β для всієї поверхні електрода, де $\sum_{i=1}^{N} S_i$ – повна площа N напівсферичних нановістрь. Позначимо $M_0 = \left(1/E_0^2\right)\cdot\left(\left(\sum_{i=1}^{N} j_i S_i\right)/\left(\sum_{i=1}^{N} S_i\right)\right)$. Одержуємо вираз: $M_0 = \beta^2 \exp\left(-B/\left(e\beta E_0\right)\right)$.

З виразу (3) знайдено узагальнений коефіцієнт підсилення β прикладеного електричного поля:

$$\beta = B\Big/\left(2eE_0 \cdot LambertW\left(B\Big/\left(2\sqrt{M_0}eE_0\right)\right)\right). \quad (4)$$

Список використаних джерел

1. Бельский М.Д., Бочаров Г.С., Елецкий А.В., Sommerer T.J. Усиление электрического поля в холодных полевых катодах на основе углеродных нанотрубок. *ЖТФ*. 2010. Т. 80, вып. 2. С. 130-137.
2. Fowler R.H., Nordheim L. Electron Emission in Intense Electric Fields. *Proc. Roy. Soc. A*. 1928. 119 No. 781. P. 173-181.

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

РЕЗОНАНС ПРЯМОЇ АМПЛІТУДИ ЕФЕКТУ КОМПТОНА ДЛЯ УЛЬТРАРЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕНЕРГІЙ ЕЛЕКТРОНІВ У СИЛЬНОМУ ЛАЗЕРНОМУ ПОЛІ

Теоретично досліджено резонансне комптонівське розсіювання при початкових енергіях електронів порядку 100 ГеВ у надсильних лазерних полях з інтенсивністю до 10^{24} Вт/см^2. Показано, що резонансний переріз розсіювання може бути на кілька порядків більшим за переріз ефекту Комптона за відсутності зовнішнього поля.

Резонансний ефект Комптона в полі світлової хвилі досліджується давно (див., наприклад, [1-3]). У статті [1] розглядався процес комптонівського розсіяння при нерелятивістських початкових енергіях електронів у полі слабкої електромагнітної хвилі. У цій роботі, на відміну від попередніх, вивчається резонансний ефект Комптона ультрарелятивистских електронів у сильних і надсильних лазерних полях. Ми будемо розглядати резонансні процеси для частинок високих енергій, коли основним параметром є класичний релятивістсько-інваріантний параметр

$$\eta = eF\lambda\!\!\!^{-}/mc^2 \gtrsim 1, \quad (1)$$

який чисельно дорівнює відношенню роботи поля на довжині хвилі до енергії спокою електрона (e і m – заряд і маса електрона, F і $\lambda\!\!\!^{-} = c/\omega$ – напруженість і довжина хвилі електричного поля, ω – частота хвилі). Будемо використовувати релятивістську систему одиниць: $\hbar = c = 1$.

Резонансна поведінка амплітуди комптонівського розсіяння зумовлена квазідискретною структурою системи: електрон + плоска електромагнітна хвиля, внаслідок чого 4-квазіімпульс проміжного електрона, зумовлений реалізацією законів збереження енергії-імпульсу в компонентах процесу, лежить на масовій оболонці [3]. Отримаємо максимальний резонансний диференціальний переріз для каналу А:

$$R_{\eta(r)}^{\max} = r_e^2 c_{\eta i} \Psi_{\eta i(r)}. \quad (2)$$

Тут функція $\Psi_{\eta i(r)}$ визначає спектрально-кутовий розподіл резонансного перерізу комптонівського розсіювання для каналу А, а $c_{\eta i}$ - коефіцієнт, який визначається параметрами лазерної установки. Фізичний зміст параметра визначається малими

переданими імпульсами, а також резонансною шириною, пов'язаною з повною ймовірністю лазер-стимульованого ефекту Комптона.

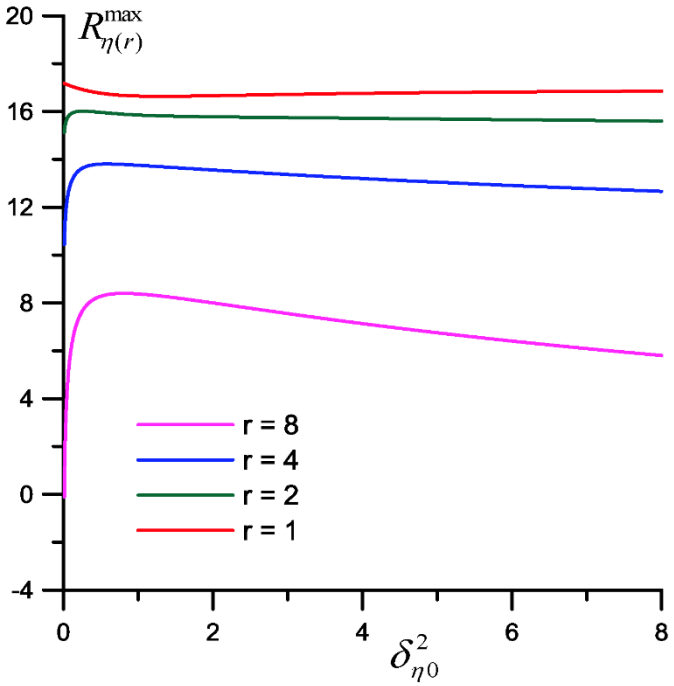


Рис. 1. Максимальний резонансний диференціальний поперечний переріз (в одиницях r_e^2) як функції відповідних кутів виходу, нанесений на графік для різних значень поглинених хвильових фотонів. Інтенсивність лазерної хвилі $I \approx 1.861 \cdot 10^{18}$ Wcm^{-2}.

З рисунку 1 видно, що зі збільшенням кількості поглинених фотонів спектрально-кутові функції розподілу зменшуються. Це призводить до зменшення величини резонансних диференціальних перерізів і збільшення резонансних частот. Показано, що резонансний диференціальний переріз має найбільше значення в області середніх лазерних полів ($I \sim 10^{18}$ Wcm^{-2}) і може досягаати $\sim 10^{18}$ в одиницях r_e^2. Зі збільшенням інтенсивності лазерної хвилі величина резонансного диференціального перерізу $R^{\max}_{res}$ зменшується і для інтенсивності $I \sim 10^{24}$ Wcm^{-2} становить $R^{\max}_{res} \lesssim 10^6$ в одиницях r_e^2.

Отримані результати розкривають нові особливості комптонівського розсіяння ультрарелятивістських електронів у сильних лазерних полях і можуть бути перевірені на міжнародних лазерних установках.

Список використаних джерел

1. A.I. Voroshilo and S.P. Roshchupkin, Resonant scattering of a photon by an electron in the field of a circularly polarized electromagnetic wave // Laser Phys. Lett., vol. 2, no. 4, 184-189, 2005.

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

3. Недорешта В. М., Ворошило О. І. Резонансна кінематика розсіяння електронів та фотонів високих енергій в сильному лазерному полі // матеріали СПЕТФ та МНФ,. м. Суми, 12-14 квітня 2021 р. – Суми: СумДПУ, 2021. – с. 55-56.

Новак О. П.,
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник;
Дяченко М. М.,
кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник;
Холодов Р.І.,
доктор фізико-математичних наук., член кореспондент НАН України, в.о. директора;
Інститут прикладної фізики НАН України, м. Суми, Україна,
novak-o-p@ukr.net

ЗНИЖЕННЯ САМОПОЛЯРИЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОНІВ В ПРОЦЕСІ НЕЛІНІЙНОГО СИНХРОТРОННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Квантова електродинаміка (КЕД) є найбільш перевіреною теорією сучасності. Однак, залишається актуальним питання перевірки КЕД в нелінійному режимі, який характеризується високими енергіями частинок та сильними зовнішніми електромагнітними полями, порівняними за напруженістю з критичним Швінгерівським полем $H_c \approx 4.41 \cdot 10^9$ Тл.

Наразі відкриваються перспективи дослідження нелінійної КЕД в лабораторних умовах завдяки прогресу лазерної техніки. Наприклад, проєкт LUXE передбачає проведення експериментів по зіткненню високоенергетичного електронного пучка EuXFEL з 100 ТВ лазерними імпульсами, що дозволить вперше досліджувати спінові ефекти в процесі випромінювання фотона в нелінійному режимі [1]. Сильні магнітні поля характерні для астрофізики. Яскравим прикладом є магнетари з магнітними полями, що можуть значно перевищувати H_c. Каскади процесів емісії фотонів та фотонародження e^-e^+ пар є важливим елементом моделей магнітосфер пульсарів [2].

Значний інтерес представляє вплив спінів та поляризації фотонів в процесах в сильних полях [3]. Наслідком випромінювання фотонів є радіаційна самополяризація електронів завдяки ефекту Соколова-Тернова. В слабких полях час самополяризації дуже великий, але в режимі сильного поля, як передбачається, електрони здатні самополяризуватися за кілька фемтосекунд [1,4]. Зазначимо, що цей швидкий спіновий ефект є однією з цілей експерименту LUXE.

В даній роботі розглядаються спінові та поляризаційні ефекти в процесі синхротронного випромінювання (СВ) в нелінійному режимі в сильному магнітному полі. Вплив нелінійних квантових ефектів характеризується безрозмірним параметром

$$\varepsilon = \frac{E}{mc^2}\frac{H}{H_c}. \tag{0.2}$$

Показано, що при збільшенні ε відбувається зменшення ступеню поляризації випромінювання та послаблення ефекту Соколова-Тернова.

Інтенсивності СВ з урахуванням спіну електрона та поляризації фотона одержано в [5]. Якщо електронний пучком має початкову поляризацію μ, то ступінь поляризації кінцевих електронів за означенням має вигляд

$$P_e^{\mu} = \frac{I^{\mu+} - I^{\mu-}}{I^{\mu+} + I^{\mu-}}, \tag{0.3}$$

де $I^{\mu\mu'}$ – інтенсивності СВ, сумарні за поляризацією фотонів, а μ та μ' позначають поляризацію початкового та кінцевого електронів. У явному вигляді ступінь поляризації дорівнює

$$P_e^{\mu} = \frac{2(r^2-1)K_{2/3}(\lambda) - 2\mu(r+1)K_{1/3}(\lambda) - (r^2-1)Y(\lambda)}{2\mu(r^2+1)K_{2/3}(\lambda) - 2\mu(r-1)K_{1/3}(\lambda) - (r^2-1)Y(\lambda)}, \tag{0.4}$$

де $K_\nu(\lambda)$ – функції Макдональда, а також позначено

$$Y(\lambda) = \int_{\lambda}^{\infty} K_{1/3}(x)dx, \tag{0.5}$$

$$\lambda = \frac{2\rho}{\varepsilon(1-\rho)}, \qquad \rho = \Omega/\varepsilon, \qquad \Omega = \frac{\hbar\omega}{mc^2}\frac{H}{H_c}, \qquad r = \frac{2-\rho}{\rho}. \tag{0.6}$$

На рис. 1 зображено графіки ступеню поляризації електронів в процесі СВ поляризованим пучком електронів, в залежності від параметру ε та частоти фотону. Як бачимо, у випадку $\mu = +1$, спостерігається повна деполяризація електронів при випромінюванні фотонів певної частоти $\omega(\varepsilon)$ (штрихпунктирна ізолінія). У випадку $\mu = -1$, ступінь поляризації залишається від'ємним, але зменшується за абсолютною величиною при збільшенні параметру ε. Така поведінка P_e^{μ} зумовлена збільшенням імовірності процесів зі зміною проєкції спіну електрона при збільшенні ε.

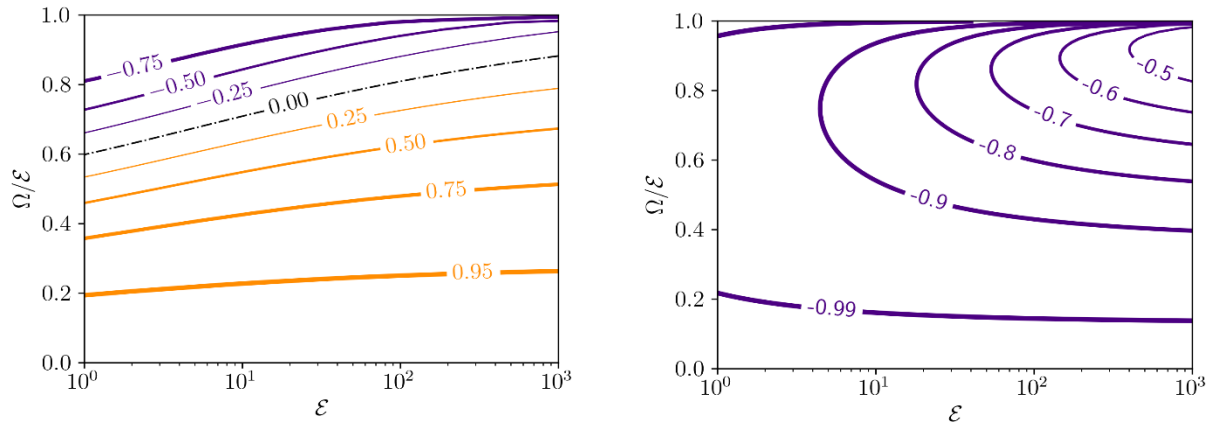


Рис.1: Контурні графіки ступеню поляризації електронів P_e^{μ} внаслідок СВ поляризованим пучком електронів. Зліва: $\mu = +1$; справа: $\mu = -1$.

Список використаних джерел

1. H. Abramowic et al. Eur. Phys. J. Spec. Top. **230**, 2445–2560 (2021).
2. P. A. Sturrock. The Astrophys. J. **164**, 529–556 (1971).
3. D. Seipt and B. King. Phys. Rev. A **102**, 052805 (2020).
4. А. А. Соколов, И. М. Тернов. Синхротронное излучение (Наука, Москва, 1966).
5. O. Novak, R. Kholodov. Phys. Rev. D **80**, 025025 (2009).

Овчаренко А.Ю.
аспірант, спеціальність «104 Фізика та астрономія»,
Лебедь О.А.
доктор фізико-математичних наук, старший дослідник,
Інститут прикладної фізики НАН України,
м. Суми, Україна
oartturr@gmail.com, lebedO@ukr.net

ФОРМУВАННЯ ФАЗОКОНТРАСТНОГО ЗОБРАЖЕННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ТЕСТОВИХ ОБ'ЄКТІВ

Дослідження внутрішньої структури об'єктів за допомогою методів рентгенівського фазового контрасту набуває широкого використання у різних областях науки і техніки [1].

Даний метод базується на явищі заломлення променів, що призводить до зміни фазового фронту хвилі, яка пройшла через об'єкт. В результаті такої деформації фазового фронту рентгенівські промені відхиляються від свого первинного напрямку на кути певної величини, яка залежить від просторового розподілу щільності речовини в досліджуваному об'єкті. Значний науковий інтерес та прикладне значення представляє собою аналітичний розрахунок рентгенівського фазоконтрастного зображення шляхом обчислення розподілу інтенсивності в площині детектора для різних типів досліджуваного об'єкта. Розвиток фізичних уявлень про формування рентгенівських фазоконтрастних зображень передбачає визначення критичних параметрів для дослідницьких установок різних типів, які необхідні для вирішення прикладних задач для застосувань в медицині та матеріалознавстві.

Спираючись на основні принципи скалярної теорії дифракції, а також принцип Гюйгенса-Френеля, зміну хвильового фронту падаючого на об'єкт, можна описати наступним рівнянням:

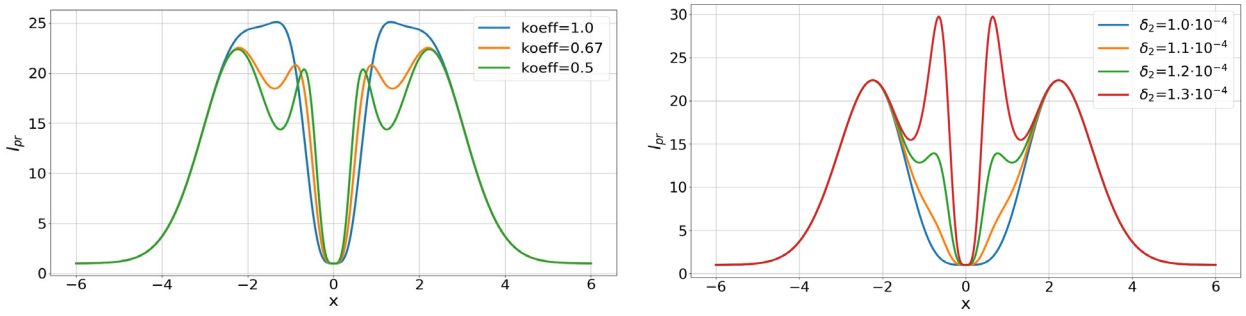
$$\psi_\omega(x,y,z=\Delta) = \exp(ik\Delta)\left[1+\frac{i\Delta\nabla^2}{2k}\right]\sqrt{I_\omega(x,y,z=0)}\exp\left[i\phi(x,y,z=0)\right],$$

де Δ – відстань від джерела до об'єкта, ∇^2 – оператор Лапласа, k – хвильове число, $\mathrm{I}(x,y,z=0)$ – інтенсивність падаючої хвилі, ϕ – фаза [2]. Враховуючи залежність зміни фази випромінювання від варіації товщини об'єкта $T(x,y)$: $\phi_\omega(x,y,z=0) = -\frac{\omega}{c}\sum_{j=1}^{M}\delta_j T_j(x,y)$, рівняння набуде вигляду:

$$\psi_\omega(x,y,z=\Delta) = \exp(ik\Delta)\left[1+\frac{i\Delta\nabla^2}{2k}\right]\sqrt{I_\omega(x,y,z=0)}\exp\left[-i\frac{\omega}{c}\sum_{j=1}^{M}\delta_j T_j(x,y)\right],$$

де M – кількість включень, з яких складається об'єкт, δ_j – показник заломлення j-го включення, ω – частота падаючого випромінювання. Для знаходження профілю інтенсивності на детекторі, слід обчислити квадрат модуля хвильової функції: $I_\omega(x,y,z=\Delta) = |\psi_\omega(x,y,z=\Delta)|^2$. В даній роботі виконано теоретичний розрахунок розподілу інтенсивності для неоднорідного об'єкта з включеннями, які мають різну форму та показники заломлення.

Побудовано графіки профілю розподілу інтенсивності для випадку плоскої монохроматичної хвилі для однорідного об'єкта, а також об'єкта із включеннями. Здійснено порівняння одержаних розрахунків для випадків різної форми додаткового включення.



а) б)

Рисунок 1. Розподіл інтенсивності

На рис.1а зображено теоретичний розрахунок розподілу інтенсивності фазоконтрастного зображення 2-компонентного неоднорідного об'єкта для різних розмірів другорядного включення та сталих показниках заломлення 1-ї і 2-ї компонент. Параметр "koeff" відповідає за зміну розмірів 2-ї компоненти об'єкта та змінюється відповідно. Як видно з графіків, зменшення ширини включення призводить до формування двох додаткових максимумів по центру, викликаних заломленням променів. Тому зміна розмірів включення призводить до помітних змін розподілу інтенсивності. На рисунку 1б показано

вплив зміни показника заломлення другорядного включення δ_2 на розподіл інтенсивності за умови сталого показника заломлення 1-ї компоненти $\delta_1 = 1.0 \cdot 10^{-4}$. Розрахунки показують, що за наявності включення в тестовому об'єкті, спостерігаються додаткові максимуми профілю інтенсивності, зумовлені варіаціями густини зразка. Дані максимуми стають більш помітними зі зміною форми кривизни включення. Пояснюється дане явище тим, що, у зв'язку з різними показниками заломлення та формою компонентів об'єкту, кожен із матеріалів впливає на рентгенівські промені по-різному, відхиляючи їх на різні кути, завдяки чому і виникають додаткові максимуми на екрані.

Одержані дані можуть бути використані для розрахунку видимості фазоконтрастного зображення на реальному детекторі і визначення критичних параметрів експериментальної установки. Важливо, щоб параметр видимості зображення (співвідношення значень максимумів та мінімумів інтенсивності) відповідав діапазону інтенсивності, який може фіксувати детектор.

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.

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

РОЗКРИТТЯ ТРІЩИНИ НА МЕЖІ ПРУЖНОЇ ПІВПЛОЩИНИ ТА ЖОРСТКОЇ СТІНКИ

Розклинювання кусково-однорідної площини скінченним клином уздовж напівнескінченної або скінченної міжфазної тріщини з урахуванням гладкого контакту берегів тріщини біля її вершини за моделлю Комніноу [5] вивчено в роботах [3, 4]. Нижче розглянуто межове розклинювання півплощини напівнескінченним клином з невідомими заздалегідь межами областей гладкого контакту клина з берегом тріщини та фрикційного контакту між жорсткою основою та берегом тріщини в околі її вершини. Цю задачу можна розглядати як граничний випадок задачі про розклинювання кусково-однорідної площини, коли один із матеріалів є абсолютно жорстким.

Нехай пружна півплощина $0 \le r < \infty$, $0 \le \varphi \le \pi$ з'єднана вздовж променю $\varphi=0$ із жорсткою основою. Уздовж напівнескінченної тріщини $\varphi = \pi$ площина розклинюється абсолютно жорстким клином шириною h . Край клина заокруглений так, що його ширина на краю плавно спадає за квадратичним законом, а його верхня грань зрізана вздовж параболи радіусу кривизни R у своїй вершині. Вважаємо, що верхня грань клина гладко контактує з берегом тріщини на інтервалі $r_1 \le r < \infty$. Відстань r_1 від вершини тріщини до області контакту $r_1 \le r < \infty$, $\varphi = \pi$ заздалегідь невідома, а відстань r_2 до незрізаної частини клина задана. Вважаємо також, що згідно з моделлю Комніноу [20] поблизу вершини тріщини її береги контактують в області $0 < r \le r_0$ невідомого розміру r_0, де нормальні та дотичні напруження зв'язані законом тертя Амонтона.

Із застосуванням методу Вінера – Гопфа [1] інтегральне рівняння задачі відносно функції контактних напружень зведено до нескінченної системи алгебричних рівнянь. Завдяки мализні області контакту берегів тріщини поблизу її вершини, отримано

асимптотичний розв'язок цієї системи, відносне відхилення якого від точного розв'язку не перевищує 10^{-6}. Знайдено розмір r_0 контакту берегів тріини, а для визначення відстані r_1, що визначає область контакту клина з берегом тріщини, отримано трансцендентне рівняння. Знайдено напруження та переміщення на межі півплощини та коефіцієнт інтенсивності напружень K_{II}, який характеризує сингулярне поле напружень в околі вершини тріщини.

Обчислення проведено для коефіцієнта Пуассона $\nu = 0.3$ і різних значень безрозмірного параметра кривизни hR/r_2^2 заокругленого краю клина та коефіцієнта тертя μ_0. Відносний розмір r_0^0/r_2 області контакту берегів тріщини біля її вершини у випадку гладкого контакту ($\mu_0 = 0$) для прямокутного клина ($R = 0$) дорівнює $8.16\cdot10^{-6}$. Значення коефіцієнтів ρ_R, ρ_μ впливу заокруглення краю клина та тертя на цей розмір ($r_0 = \rho_R\rho_\mu r_0^0$), які подано у табл. 1, 2, показують, що збільшення заокруглення помітно зменшує відносний розмір r_0^0/r_2 (це можна пояснити зменшенням відстані r_1 від вершини тріщини до краю півнескінченної області контакту), а наявність тертя майже пропорційно до коефіцієнту тертя дещо збільшує його. У таблицях також подано коефіцієнти k_R, k_μ впливу заокруглення та тертя на коефіцієнт інтенсивності напружень K_{II} ($K_{II} = k_R k_\mu K_{II}^0$) відносно його значення $K_{II}^0 = 2(2\pi)^{1/2}(1-\nu)Gh$ у випадку $R = 0$, $\mu_0 = 0$. Коефіцієнт K_{II} збільшується зі зростанням як радіусу заокруглення (через збільшення розкриття тріщини), так і коефіцієнта тертя (через зростання жорсткості системи). Крім того, у табл. 1 для різних значень параметра кривизни подано відносну відстань r_1/r_2 від вершини тріщини до області контакту між клином і жорсткою основою. У дужках наведено відповідні значення для більш простої задачі про розклинювання однорідної площини [2, с. 313] за відсутності області контакту берегів тріщини біля її вершини та відповідним коефіцієнтом K_I. Дещо неочікуваним є те, що розбіжність між результатами обчислень у цих двох задачах, виявилась зовсім невеликою.

Таблиця 1

Залежність параметрів задачі від кривизни

hR/r_2^2	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
ρ_R	0.976	0.928	0.883	0.805	0.731	0.654	0.563
k_R	1.012 (1.011)	1.038 (1.037)	1.064 (1.062)	1.113 (1.109)	1.166 (1.159)	1.229 (1.219)	1.315 (1.294)
r_1/r_2	0.960 (0.962)	0.881 (0.884)	0.807 (0.812)	0.680 (0.690)	0.560 (0.574)	0.436 (0.456)	0.288 (0.320)

Таблиця 2

Залежність параметрів задачі від коефіцієнта тертя

μ_0	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5
ρ_μ	1.015	1.031	1.038	1.047	1.063	1.079
k_μ	1.013	1.026	1.033	1.040	1.054	1.069

Список використаних джерел

1. *Нобл Б.* Метод Винера – Хопфа. – Москва: Изд-во иностр. лит., 1962. – 280 с.

2. *Острик В. І.* Контактна механіка: підручник. – Київ: ВПЦ «Київський університет», 2015. – 560 с.

3. *Симонов И. В.* О расклинивании кусочно-однородной упругой среды // Прикл. математика и механика. – 1985. – **49**, № 2. – С. 275–283.

4. *Симонов И. В.* Трещина на границе раздела двух упругих сред при расклинивании // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1985. – № 3. – С. 105–112.

5. *Comninou M.* Interface crack with friction in the contact zone // J. Appl. Mech. – 1977. – **44**. – P. 780–781.

Пасько О. О.
кандидат педагогічних наук, доцент
Сумський державний університет
Лебединська Ю.С.
викладач фізики та астрономії
Машинобудівний фаховий коледж СумДУ
Суми, Україна,
o.pasko@aph.sumdu.edu.ua

ВІРТУАЛЬНИЙ ДЕМНСТРАЦІЙНИЙ ФІЗИЧНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ

Експеримент у шкільному курсі фізики - це відображення наукового методу дослідження, що властивий фізиці-науці. Постановка дослідів і спостережень має велике значення для ознайомлення учнів із сутністю експериментального методу, з його роллю в наукових дослідженнях з фізики, а також для озброєння школярів деякими практичними навичками.

Використання у навчальному процесі з фізики демонстраційного експерименту забезпечує більш глибоке засвоєння одиниць фізичного змісту, підвищує інтерес школярів до вивчення предмета, сприяє формуванню наукового світогляду учнів.

Труднощі оснащення навчальних фізичних лабораторій сучасним обладнанням та вимушений перехід на дистанційне навчання обумовлюють тенденцію витіснення навчального експерименту його моделюванням. Так під час пояснення матеріалу вчителем все частіше інформація про експеримент з'являється у вигляді статичних чи динамічних ілюстрацій на слайдах презентації або в анімаційному ролику ~~в низці випадків~~ за відсутності первинної натурної демонстрації фізичних явищ.

Процес навчання фізики полягає в послідовному формуванні нових для учнів фізичних понять і теорій на основі небагатьох фундаментальних положень, що опираються на дослід. У ході цього процесу знаходить відображення індуктивний характер встановлення основних фізичних закономірностей на базі експерименту і дедуктивний характер виведення наслідків із встановлених таким чином закономірностей з використанням доступного для учнів математичного апарату.

Виділяють такі функції навчального експерименту.

1. Утворення чуттєво-наочних образів, які служать матеріалом для формування уявлень про одиниці навчального змісту шкільного курсу фізики.
2. Моделювання реальних (матеріальних) умов для організації предметної репродуктивної пізнавальної діяльності з метою засвоєння поняття і оволодіння ним.
3. Моделювання практичних проблемних ситуацій, які дають можливість учням застосувати власні знання у незнайомих умовах, що вимагає здійснення творчої діяльності.

Відповідно, експеримент, який виконує першу функцію, може бути представлений здебільшого у вигляді демонстрацій. Він служить для створення образів сприйняття, які є матеріалом для формування уявлень про фізичні явища, поняття, тощо. Експеримент, який виконує другу функцію, може бути представлений у вигляді експериментальних завдань, фронтальних дослідів і лабораторних робіт з метою закріплення й подальшого поглиблення знань школярів. До групи експериментів, що виконують третю функцію належать проблемні демонстрації, творчі експериментальні завдання й роботи фізичного практикуму [2].

Демонстрація дослідів на уроках фізики має широкі перспективи використання технологій цифрового моделювання і при цьому передбачає збір та розробку специфічних аудіовізуальних інформаційних матеріалів, що утворювали б медіатеку фізичних об'єктів, яка містить статичні (рисунки, фотографії) та динамічні (відео- та звукові фрагменти, анімації, комп'ютерні інтерактивні моделі) моделі дослідів.

Методика демонстрування будь-якого з перелічених конструктів має відповідати загальнодидактичним вимогам, наведеним вище. Цифрові модельні демонстрації мають деякі специфічні особливості. Для реалізації принципу наочності необхідно враховувати два аспекти: оптимальна побудова інтерфейсу ресурсу та реалістичність модельних зображень.

Структура діяльності учнів у процесі проведення демонстраційного експерименту з фізики на основі цифрової техніки може бути такою [1].

1. Виходячи із логіки вивчення конкретного фрагменту навчального матеріалу, визначають мету експерименту, його задачі або висувають гіпотезу, яку треба перевірити.

2. З'ясовують, яким шляхом можна вирішити сформульоване перед цим завдання, зокрема моделюють принципову схему дослідної установки.

3. Визначають необхідні прилади й матеріали.

4. Складають (аналізують віртуальну) дослідну установку.

5. Визначають послідовність операцій під час виконання дослідів.

6. Звертають увагу учнів на те, за чим необхідно спостерігати під час проведення досліду. Здійснюють демонстрацію досліду. Фіксують результати спостережень.

7. Аналізують одержані результати і формулюють відповідні висновки.

Застосовують подібні демонстрації звичайно в тому випадку, якщо неможливий натурний експеримент, якщо дослід або фізичне явище швидко (повільно) протікає, якщо використовуються дорогі витратні матеріали, коли у ході досліду не забезпечується необхідна видимість, якщо досліди не відповідають вимогам безпеки, якщо потрібно показати виробничий процес або явища природи і врешті, якщо натурна демонстрація не забезпечує у повній мірі розуміння сутності явища чи процесу, що вивчається.

Список використаних джерел

1. Каленик М. Методика віртуального демонстраційного фізичного експерименту / М. Каленик, О. Пасько // Фізика та астрономія в школі : Науково-методичний журнал. - 2009. - N 1. - С. 29-32.

2. Шамало, Т.Н. Теоретические основы использования физического эксперимента в развивающем обучении Текст.: учебное пособие к спецкурсу / Т.Н. Шамало. — Свердловск, 1990. 97 с., с. 86

Пекельний Д.О.
студент, спеціальність «131 Прикладна механіка»,
Мусієнко О. С.
асистент,
Фам Д. К.
кандидат технічних наук, доцент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна
pekelnyda@gmail.com

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛІВ РОЗПОДІЛУ НАПРУЖЕНЬ ТА ДЕФОРМАЦІЇ МЕТОДОМ ФОТОПРУЖНОСТІ В ОРТОПЕДИЧНИХ ІМПЛАНТАТАХ

На сьогоднішній день для лікування відсутності зубів у пацієнтів використовуються метод вживляння зубних імплантатів на пряму в кістку щелепи. Однак цей метод, через можливі хвороби кісток не завжди є можливим для встановлення гвинта вертикально. З

цього випливає актуальність дослідження допустимого відхилення від вертикалі при встановлені імплантата. Одним із методів вирішення цієї інженерної задачі є розрахунки з використанням сучасних методів комп'ютерного аналізу, але в силу своїх можливостей та недоліків, цей метод потребує верифікації для подальшого використанням.

Метою даної роботи є дослідження полів розподілу напруження та деформації за допомогою експериментального методу фотопружного аналізу, що дозволить в подальшому верифікації математичних моделей.

Для цього з прозорого матеріалу виготовляється тонкий прямокутний зразок, в якому розміщено імплант (рис. 1). В якості матеріалу зразка було використано ювелірну епоксидну смолу, яку було залито в виготовлену для цього силіконову форму.

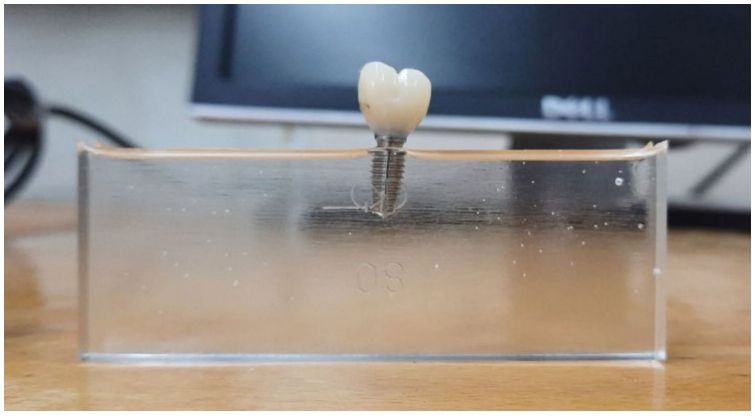


Рис.1 – Зубний протез в епоксидній смолі MagicCrystal 3D

Зразок розміщується в полярископ (рис.2) і фотографували без навантаження, для того, щоб переконатися у відсутності напружень на моделях. Після чого послідовно до поверхні імланту за допомогою універсальної випробувальної машини прикладали осьове навантаження. Під час випробування в кімнаті мають бути вимкнені сторонні джерела світла.

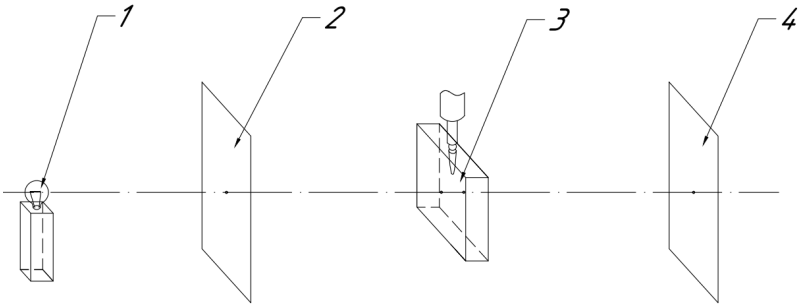
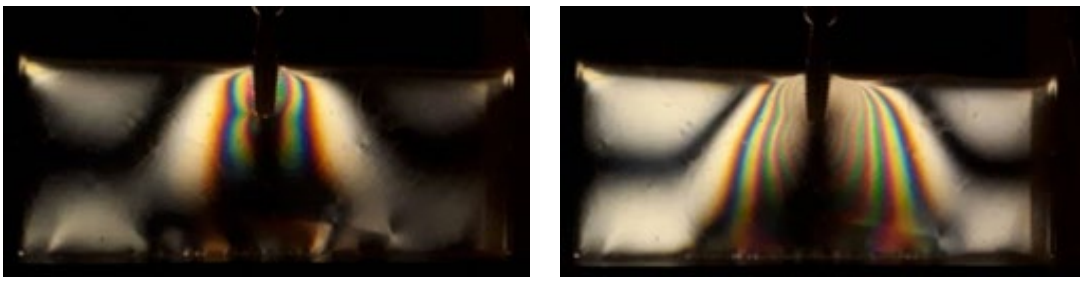


Рис 2. – Полярископ, що складається з джерела світла (1), поляризатора (2),зразка (3), аналізатора (4)

При досягненні певних значень навантаження зразок фотографується для фіксації розподілу навантажень в ньому.

По завершенні експерименту всі фотографії були якісно проаналізовані, щоб перевірити напрямок та інтенсивність напружень. При цьому, чим вищий порядок смуг і число смуг, тим більша інтенсивність напружень. Крім того, чим ближче розташовані смуги одна до одної, тим вища концентрація напружень.



а) б)

Рис 3. – Розподіл в зразку навантажень при значенні 20 *Н (а) та* 200 *Н (б)*

Далі результати випробування порівнюють з симуляцією в ПК ANSYS і роблять висновки стосовно відповідності моделі реальному зразку. У разі досягнення необхідної точності розрахунків модель зразка замінюється в ПК ANSYS на модель кістки і проводяться остаточні розрахунки.

Отже, обрана методика дозволяє проводити розрахунки при різних моделях зубних імплантів та є в цілому корисною для верифікації результатів обрахунку складних тіл.

Поліщук А.В.
Інститут прикладної фізики НАН України
м. Суми, Україна,
polishukav@ipfcentr.sumy.ua
Павлюк М.О.
аспірант, спеціальність 105 «*Прикладна фізика та наноматеріали*»,
Сумський державний університет,
м. Суми, Україна,
m.pavlyuk@aph.sumdu.edu.ua

ЧИСЕЛЬНА ОЦІНКА КОНТРАСТНОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ В МЕТОДІ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ФАЗОВОГО КОНТРАСТУ НА ОСНОВІ ВІЛЬНОГО ПОШИРЕННЯ

Метод фазового відновлення [1, с. 11] є одним з фундаментальних методів для застосування у рентгенівському фазовому контрасті(РФК) для покращення якості, а особливо контрастності отриманих в експериментах зображень. Але без належного підходу та обробки він дає некоректні візуальні результати. Нормалізація радіограм [2, с. 5] є одним з необхідних кроків для отримання неспотвореного та позбавленого додаткових “шумів” зображення внутрішньої структури об’єкту дослідження. Нормалізованим знімком є:

$$I_n(x,y)=\frac{I(x,y)}{I_0(x,y)}=\frac{S_{obj}(x,y)-S_{dark}(x,y)}{S_{flat}(x,y)-S_{dark}(x,y)}, \quad (1)$$

де $S_{obj}(x,y)$ є візуалізаційний(зареєстрований на детекторі) сигнал, коли на шляху зондуючих рентгенівських променів присутній об’єкт; $S_{dark}(x,y)$ є так званим “темним” сигналом, коли на детектор не потрапляє жоден із рентгенівських фотонів (іншими словами, джерело рентгенівського випромінювання вимкнене); $S_{flat}(x,y)$ це сигнал на детекторі, коли на шляху рентгенівських променів об’єкт дослідження відсутній. В якості об’єкту візуалізації виступає крило білокрилки - комахи-шкідника різноманітних сільськогосподарських овочевих та ягідних культур.

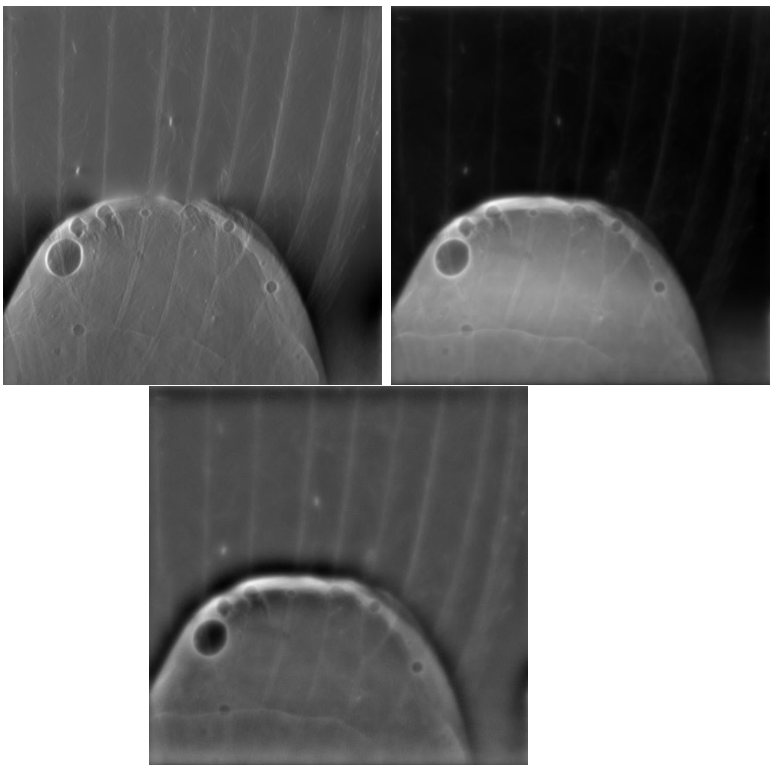
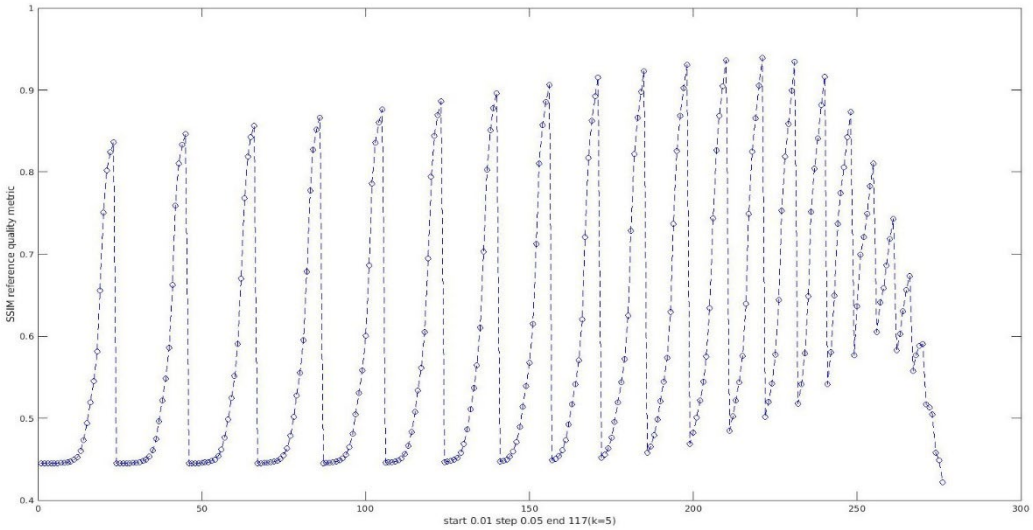


Рис. 1. Нормалізоване зображення біологічного об'єкту, оброблене трьома способами середовищем PITRE [3]. Фазове відновлення для нижчезазначених підходів (зліва направо): $1.\gamma = 10^3; 2.\gamma = 10^2; 3.\gamma = 10^4 та \epsilon = 10^{-5}$.

Існують різні підходи для застосування в фазовому відновленні [4]. Одними з таких є модифікація Броннікова, наближення одного матеріалу та метод Фур'є у першому Борнівському наближенні.

Для нормалізації було вибрано середовище Matlab [5]. Також даний ресурс дозволяє апелювати чотирма математичними функціями-критеріями (MS-SSIM, IMMSE, PNSR, SSIM) для чисельної оцінки відхилень від обраного референсного зображення. Відхиленнями в даному випадку був штучно введений шум.



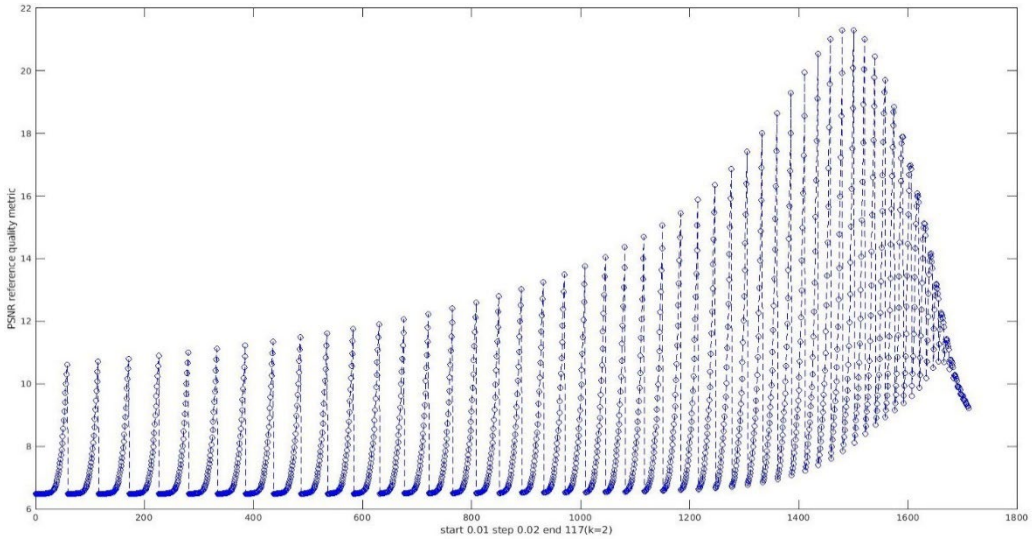


Рис. 2. Чисельні оцінки контрасту та оптимальні значення для підбору найбільш сприйнятних зображень.

Отже, було створено концепт для покращення та більш точного застосування нормалізації перед процедурою фазового відновлення. У процесі наших досліджень також створена програма, що дозволяє оцінити ступінь подібності даному, обраному дослідником, контрастному зображенню. Дана програма є дослідницьким продуктом і може служити фундаментом для автоматизації обробки експериментальних знімків у РФК на основі вільного поширення.

Список використаних джерел

1. D. M. Paganin, et al., 2019. URL: https://arxiv.org/abs/1902.00364
2. T. Weitkamp, et al., J. Synchrotron Rad., 18, 617–629, 2011.
3. R. C. Chen, et al., J. Synchrotron Rad., 19(5), 2012.
4. A. Burvall, et al., Opt. Express, Vol. 19, No. 11, 2011.
5. Matlab-online, URL: https://matlab.mathworks.com/

Пономарьов О.Г.
доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу,
Колінько С.В.
кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник,
Ребров В.А.
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,
Положій Г.Є.
аспірант, спеціальність «104 - Фізика та астрономія»
Салівон В.Ф.
провідний інженер,
Інститут прикладної фізики НАН України,
м. Суми, Україна
kolinko@ipflab.sumy.ua

СИСТЕМА СКИДАННЯ ПУЧКА ЗІ ЗРАЗКА ДЛЯ КАНАЛУ ПРОТОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ЛІТОГРАФІЇ АНАЛІТИЧНОГО ПРИСКОРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ІПФ НАН УКРАЇНИ

Розроблено електростатичну систему швидкого скидання пучка зі зразку для технології протонно-променевої літографії. Система дозволяє призупинити опромінення

зразка як на час його механічного позиціонування, так і на час переміщення пучка проміж зонами опромінення.

Система складається з пари електростатичних відхиляючих пластин, джерела живлення 400В зі швидкодіючим комутатором, та системи, яка передає сигнал керування з персонального комп'ютера.

Відхиляюча система розміщена в каналі одразу після об'єктного коліматора по ходу пучка, що забезпечує максимальне лінійне зміщення. Джерело живлення має трансформаторну гальванічну розв'язку від мережі, не стабілізоване. Ключ на польових транзисторах керується драйвером, сигнал приймається через оптронну розв'язку. Керуючий сигнал формується системою управління скануванням як в ручному, так і в автоматичному режимах.

Систему введено в експлуатацію, вона протестована та повністю відповідає технічнім вимогам каналу протонно-променевої літографії аналітичного прискорювального комплексу ІПФ НАН України.

Пономарьов О.Г.
доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу,
Колінько С.В.
кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник,
Положій Г.Є.
аспірант, спеціальність «104 - Фізика та астрономія»
Інститут прикладної фізики НАН України,
м. Суми, Україна
ponom56@gmail.com

ФОРМУВАННЯ ПУЧКА В УСТАНОВКАХ ПРОТОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ЛІТОГРАФІЇ ВИСОКОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ

Розглянуто формування пучка в ортоморфній системі на базі розподіленого квадруплету магнітних квадрупольних лінз із коефіцієнтами зменшення 564×564. Такі іонно-оптичні параметри системи досягаються за рахунок застосування малої робочої відстані, що дорівнює 3 см. Однак така система має дуже високі сферичні аберації, що не дозволяє її реалізувати на практиці. Тому було запропоновано застосувати коректори аберацій із використанням системи октупольних лінз. Для цього було побудовано матрицант перетворення координат фазових моментів у октупольній лінзі. Розроблено процедуру визначення запитування октуполів, що дозволяє повністю скоригувати сферичні аберації в зондоформуючій системі. У разі повного коригування аберацій застосовується три октуполі. Розглянуто різні конфігурації розташування октуполів у системі та визначено їх параметри. Також розглянуто варіант коригування найбільшої аберації за допомогою лише одного октуполя. Проведено моделювання динаміки пучка в зондоформуючій системі з корекцією аберацій із застосуванням методу оптимізації колімованого аксептансу системи за умови фокусування пучка на мішені із розмірами 10 нм. Показано, що в цьому випадку домінуючими є хроматичні аберації і така система може бути реалізована на практиці за умови відносного енергетичного розкиду іонів у пучку на рівні 10^{-5}, що є цілком реалістичним.

Рогульський Ю.В.
кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,
Інститут прикладної фізики
Національної Академії Наук України
Суми,Україна
rogulsky@email.ua

РОЗПОДІЛ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ В ОРГАНАХ РОСЛИН ВНАСЛІДОК ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ

Рослинницька продукція є початковою ланкою трофічного ланцюга, якою потенційно небезпечні елементи можуть надходити в харчовий раціон людини, впливаючи на метаболізм і, в кінцевому підсумку, визначати якість життя. За різними даними, з їжею до організму людини надходить до 80% важких металів, і тільки 20% надходить з повітрям і водою. З цієї причини більше 25% хвороб людства обумовлені екологічними факторами (Доповідь ВООЗ, березень 2010).

Багато видів рослин здатні до накопичення важких металів, зокрема, їх вміст в органах рослин може в десятки і навіть сотні разів перевищувати вміст у навколишньому середовищі [1]. Численними дослідами встановлено, що зі збільшенням концентрації важких металів у довкіллі, поряд зі зростанням їх вмісту в корінні, підвищується кількість металів і в надземних органах - стеблах і листі. Це говорить про те, що захисні механізми і бар'єри, які функціонують на рівні клітин і тканин коріння, не в змозі повністю запобігти потраплянню важких металів у пагони рослин [2-4].

Тим не менш, розподіл важких металів у тканинах рослин є важливим чинником для розуміння механізмів їх токсичної дії і морфофізіологічних механізмів детоксикації з подальшим вдосконаленням технологій вирощування екологічно чистої продукції рослинництва. Вирішення цього завдання тісно пов'язане з необхідністю розробки методів аналізу розподілу важких металів у тканинах і клітинах рослин, які раніше фактично були відсутні.

Метою цієї роботи є дослідження накопичення і розподілу важких металів Pb, Cr, Cd і Zn у корінні і надземних органах основних сільськогосподарських зернових культур: пшениці, вівса та ячменю, вирощених в польових умовах рослинницьких господарств Сумської області на техногенно-забруднених авіаційним і автомобільним транспортом землях для оцінки техногенного ураження середовища. Ці дослідження були виконані в Інституті прикладної фізики НАН України в рамках проекту IAEA Research Project No. 17089 «Heavy Metal Transformation Dynamics in Biochemical Complexes in Trophic Chains».

Визначення вмісту металів в зразках рослин проводились на однопроменевому атомно-абсорбційному комплексі КАС-120.1 (виробництво «Selmi», Україна) який призначений для визначення вмісту «слідових» кількостей хімічних елементів у рідких пробах. Додатково, для визначення загального мікроелементного складу ґрунту, проводився PIXE аналіз усередненого зразка. PIXE аналіз проводився на аналітичного комплексі ІПФ НАН України статичного прискорювача «Сокіл».

Таблиця. Вміст важких металів у корінні, пагонах і зерні пшениці

Елемент	Проби №				
	1	2	3	4	5
	конц., мг/кг	конц., мг/кг	конц., мг/кг	конц., мг/кг	конц., мг/кг
Коріння					
Cr	26,3	12,3	9,17	13,2	11,9
Pb	139	63,6	4,27	15, 6	5,85
Cd	3,98	6,48	0,435	0,63	2,57
Zn	522	5,79	6,01	8,72	6,54

Пагони					
Cr	4,31	5,11	2,02	12,1	4,69
Pb	1,46	8,52	0,087	0,295	4,70
Cd	0,077	0,049	0,024	0,074	0,113
Zn	3,70	2,22	3,96	3,67	4,36
Зерно					
Cr	0,359	0,711	0,225	1,15	0,712
Pb	2,23	4,30	2,41	3,06	5,12
Cd	0,095	0,136	0,113	0,128	0,669
Zn	3,32	1,79	2,31	2,02	3,79

Список використаних джерел

1. *Alan J M Baker* Accumulators and excluders strategies in the response of plants to heavy metals // Journal of Plant Nutrition January.- 1981.- №3(1-4).- P. 643-654.
2. *C. Brackhage, J. Hagemeyer, S.W. Breckle, J. Greszta* Radial distribution patterns of Cd and Zn in stems of Scots pine (Pinus sylvestris L.) trees analyzed 12 years after a contamination event // Water, Air, and Soil Pollution.- 1996.- V.90.- P.417–428.
3. *Rascio, N. and Navari-Izzo, F.* Heavy Metal Hyperaccumulating Plants: How and Why Do They Do It? And What Makes Them So Interesting? // Plant Science.- 2011.- 180.- P.169-181.
4. *Серегин И. В.* Распределение тяжелых металлов в растениях и их действие на рост // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук. Институт физиологии растений РАН, Москва, 2009. 53 с.
5. ДСТУ 4287:2004 Якість ґрунту. Відбирання проб.
6. ДСТУ ISO 10381-1:2004 Якість ґрунту. Відбирання проб. Ч. 1. Настанови щодо складання програм відбирання проб.
7. ДСТУ ISO 10381-2:2004 Якість ґрунту. Ч. 2. Настанови з методів відбирання проб (ISO 10381-2:2002, IDT).
8. *O.M. Buhay, Yu.V. Rogulsky, A.N. Kulik* et.al. Simulation of atomic absorption signals: A kinetic model with two independent sources // Spectrochimica Acta. Part B.- 60.- (2005).- P. 491 – 503.
9. *Yu.V. Rogulsky, A.N. Buhay, A.A. Gudakova, and A.N. Kulik* The Model for Analitical Signal in the Atomic Absorption Spectrometry with Electrotermal Atomization // Journalof Applied Spectroscopy. - 2008.- V.75,N 3.- P. 295-298.
10. *V.Yu. Illiashenko, Yu.V. Rogulsky and A.N. Kulik* A Model for the Verification of Measurement Results in Electrothermal Atomic Absorption Spectrometry // Journal of Applied Spectroscopy.- 2011.- V.78, N 1.- P. 128-133.

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

ПОТОЧНИЙ СТАН РОЗРОБКИ УНІВЕРСАЛЬНОЇ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ І ЗБОРУ ДАНИХ НАУКОВО-НАВЧАЛЬНОЇ І ТЕХНОЛОГІЧНОЇ АПАРАТУРИ

Розподілена система керування вакуумною установкою магнетронного розпилення базується на установці ВУП-5М та побудована на принципах розподіленого керування,

коли кожна функція локалізована в конкретному обчислювальному модулі з інтерфейсом Ethernet. Кожен модуль має власну периферію, тобто датчики та виконуючі механізми, та виконує одну або декілька функцій системи. Головна програма відображає користувацький інтерфейс та зв'язки в системі відповідно загальному алгоритму робити. Такий підхід дозволяє гнучко комбінувати функції, програмувати окремі функції в конкретній системі та в подальшому масштабувати систему.

На даному етапі виконано основне проектування та розроблено конструкторську документацію на наступні складові модулі комп'ютеризованої системи керування вакуумного поста для осадження тонких плівок методом магнетронного розпилення:

датчики та модуль ПЛК для вимірювання вакууму та відповідну програму відображення даних;

- плата живлення ЕМ клапанів;
- модуль ПЛК логічних входів/виходів;
- модуль керування кроковими двигунами;
- модуль регулятора температури підкладки;
- виконана модернізація високовольтного блока живлення;
- модуль керування клапаном напуска HORIBA;
- плата керування ТМН.

Всі модулі автономні, мають інтерфейс Ethernet та відповідний програмний інтерфейс.

Розроблено загальну електричну схему системи.

Виготовлено та перевірено функціонування ряду модулів: керування ТМН, вимірювання вакууму, блок високовольтного живлення, керування клапаном напуску HORIBA, живлення ЕМ клапанів.

Розроблена концептуальна модель, встановлені основні класи, інтерфейси, взаємозв'язки та розроблена основна логіка програмного забезпечення верхнього рівня.

Висновки: Відповідно до технічного завдання та типових технічних умов виконано проектування та розроблено конструкторську документацію на наступні складові модулі системи: датчики та модуль ПЛК вимірювання вакууму, плата живлення ЕМ клапанів, модуль ПЛК входів/виходів, модуль керування кроковим двигуном, модуль регулятора температури підкладки, модулі високовольтного блока живлення, модуль керування клапаном напуска HORIBA, плата керування ТМН. Розроблено електричну схему шафи керування та пневматико-електричну загальну схему.

Список використаних джерел

1. Mariagrazia Dotoli, Alexander Fay, Marek Miśkowiczc, 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. Інформаційне забезпечення інноваційного розвитку: світовий та вітчизняний досвід : монографія / Т.В. Писаренко, Т.К. Кваша, І.В. Березняк, О.В. Прудка. - К. : УкрІНТЕІ, 2015.-239 с. І81№ 978-966-479-074-8
3. DOI:10.9790/1676-1103034350 Project: Design and Implementation of a PLC based Electricity Supply Switching Control System Basavaraj Aldi Karnatak University, Dharwad J S Kadadevarmath Np P Bannibagi Advanced Training Institute for Electronics and Process Instrumentation, Hyderabad, India

Dr. Ross D King. Automating Science using Robot Scientists. *E4R Symposium*. 2020. URL: https://www.youtube.com/watch?v=LQaKoM5YGXk

Салтикова А. І.
кандидат фізико-математичних наук, доцент
0809saltykova@gmail.com
Голишевська Д. С.
магістрант, спеціальність «014 Середня освіта (Фізика)»,
Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка,
м. Суми, Україна
volkswagen.daryna@gmail.com

ЕКОЛОГІЧНИЙ АСПЕКТ ШКІЛЬНОГО КУРСУ ФІЗИКИ

Фізика як наука, є рушійною силою науково-технічного прогресу і розвитку технологій. В той же час, у зв'язку зі зростаючим потенціалом технічного прогресу, збільшується імовірність екологічних катастроф. Тому на уроках фізики у школі необхідно розглядати проблему охорони навколишнього середовища. Шкільний курс фізики відіграє суттєву роль в екологічній освіті учнів. На уроках учні набувають знання про цілісність природи, фізичні параметри навколишнього середовища і про глобальні фізичні процеси, що відбуваються в біосфері Землі.

Екологічний аспект шкільного курсу фізики полягає в усвідомленні учням технічних і технологічних основ зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Суттєве значення мають уявлення про екологічно чисті джерела енергії (річки, вітер, сонячне випромінювання, морські припливи, геотермальні джерела та ін.), а також про замкнуті виробничі цикли.

Під час вивчення фізики в учнів треба формувати екологічно орієнтовані уявлення щодо енергозберігаючих винаходів (підвищення ККД двигунів, використання вторинних ресурсів, зменшення сировинних і енергетичних втрат в технологічних процесах тощо).

Особливу увагу слід приділяти питанням радіаційної безпеки. Аварія на Чорнобильській АЕС у 1986 році, а потім і аварія на Фукусімській АЕС у 2011 році актуалізувала розгляд у курсі фізики таких проблем, як радіаційне забруднення, радіаційний фон та його допустимі параметри, прилади для вимірювання рівня радіації, їх індивідуальне використання.

Слід зауважити, що реалізація наскрізної змістової лінії «Екологічна безпека та сталий розвиток» в освітньому процесі стосується не лише фізики, а й інших шкільних предметів, які на уроках аналізують систему «природа –суспільство-людина» та можуть демонструвати шляхи гармонізації взаємодії елементів цієї системи.

Так, наприклад, біологічні науки формують, перш за все, уявлення про рівні організації живого і системний характер взаємозв'язків в біосфері, географія — про цілісність світу природи, хімія — про забруднення природного середовища. В то же час фізика — про енергетичну взаємодію з природою.

Комплексний та інтегральний характер екологічних проблем не дозволяє розкрити їх перед учнями середніх шкіл повною мірою. Проте, зміст програмного матеріалу курсу фізики дає можливість ознайомити учнів з низкою ідей, що розкривають фізико-технічний аспект сучасної екологічної кризи та шляхів її подолання. Для реалізації цілей та завдань екологічної освіти та виховання використовують весь арсенах традиційних і інноваційних освітніх технологій.

Салтикова А. І.
кандидат фізико-математичних наук, доцент
0809saltykova@gmail.com
Алтухов А.О.
магістрант, спеціальність «014 Середня освіта (Фізика)»,
Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка,
м. Суми, Україна
tohaandtoha@gmail.com

ФІЗИЧНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ В УМОВАХ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ

В основі навчання фізики завжди був експеримент. Завдяки йому учні засвоюють наукові методи пізнання природи та оволодівають досвідом практичної діяльності людства по здобуттю фактів та їх подальшого узагальнення на рівні початкових уявлень, понять, а потім і законів. Експеримент виступає як метод навчального пізнання, він стимулює утворенню у свідомості учнів нових зв'язків та відношень, закладає суб'єктивно нові особистісні знання. Він дидактично забезпечує процесуальну складову навчання фізики, зокрема формує в учнів експериментальні вміння й дослідницькі навички, озброює їх інструментарієм дослідження, який стає засобом навчання. Навчальний експеримент реалізується у формі демонстраційного й фронтального експерименту, робіт лабораторного практикуму, домашніх дослідів і спостережень. При дистанційній формі навчання учитель може проводити демонстрації онлайн з кабінету фізики чи лабораторії, як і при очному навчанні. Але не завжди є можливість провести реальні спостереження та експерименти. Ці труднощі можна здолати за допомогою мережі Інтернет. На сьогодні там є як професіональні, так і любительські відео різних фізичних експериментів. У випадку, коли учні просто пасивно переглядають відео фрагменти дослідів, то це не дає потрібного ефекту у навчанні. Лише активне включення учнів у обговорення, проблемний підхід підштовхують їх до самостійного формулювання висновків, а значить до розуміння суті явищ, які розглядаються. Інший підхід – це використання інтерактивних симуляцій. Вони дають можливість учням самим включитися в експеримент та отримати повне уявлення про досліджуване явище. Інтерактивні симуляції пробуджують цікавість у учнів до фізики як науки, навіть у тих, хто нею не цікавився раніше, забезпечують реалізацію образу фізичної науки як науки не математичної, а експериментальної. Навчання проходить через особисті дії учнів, їх відчуття природи, їх фізику. Наївна чи глибока ця фізика залежить від рівня самого учня. Але завдяки активному включенню у експеримент цей рівень підвищується. Отже, ми маємо відповідний результат навіть в умовах дистанційного навчання.

Салтиков Д. І.
доктор філософії (природничі науки), старший викладач
Маценко М. В.
магістрантка, спеціальність «014 Середня освіта (Фізика)»,
Сумський державний педагогічний університет ім. А.С. Макаренка
м. Суми, Україна
dmytros94@gmail.com, mariamatsenko4@gmail.com

ЗНАЧЕННЯ ТА РОЛЬ ІСТОРИЗМУ В НАВЧАННІ ФІЗИКИ

Фізика, як і будь-яка наука, має свою історію і своїх творців. У завдання навчання основ шкільної фізики входить не тільки ознайомлення учнів з науковими фактами, законами і теоріями, а й з історією відкриття законів і розробкою теорій. Історизм у

викладанні фізики сприяє поліпшенню якості знань. Коли учні дізнаються про історію відкриття законів і явищ, вони швидше і краще розуміють їх. Наприклад, розповідь вчителя про історичний розвиток уявлень про природу світла, систематизує знання учнів, робить їх глибокими і усвідомленими. Завдяки використанню історії науки в навчальному процесі досягаються такі цілі:

- виховуються позитивні риси характеру, патріотизм, старанність, інтернаціоналізм, працьовитість;
- розвивається інтерес учнів до фізики;
- з'являється мотивація до вивчення нового;
- формується науковий світогляд учнів;
- розкривається діалектика розвитку і пізнання навколишнього світу;
- підвищується загальна культура учнів;
- встановлюється зв'язок науки з технікою, виробництвом;
- з'ясовується роль науки у житті суспільства.

Періодичне використання елементів історизму в процесі вивчення фізики в школі стає дієвим способом при подальшому самостійному накопиченні, осмисленні і поглибленні знань. Історизм полегшує учням засвоєння навчального матеріалу, оскільки вони уявляють собі суть методів, за допомогою яких отримують знання; завдяки цьому, учні набувають вміння «науково» працювати і «науково» мислити. При цьому створюється база для успішної загальної освіти і подальшої самоосвіти.

Аналіз навчальної літератури дозволяє стверджувати, що історичні відомості, наведені в підручниках, а з ними і знання, що даються учням, наводяться як щось застигле, незмінне раз і назавжди. Вчителю необхідно показати, як вчені від менш глибоких і точних знань приходять до досягнення більш глибоких і точних. Учитель повинен у процесі формування фізичних понять і законів показати їх історичний розвиток, розкрити боротьбу поглядів та ідей.

Можна виділити наступні форми використання історизму в навчанні фізики:

- вступні історичні огляди, які виступають як засіб обґрунтування нових знань;
- заключні історичні огляди, що виступають як засіб систематизації та узагальнення знань;
- опису історії окремих відкриттів, фундаментальних дослідів, які є засобом обґрунтування знань;
- завдання з історичним змістом;
- повні біографії вчених і фрагментарні біографічні відомості, службовці цілям формування особистості учня.

Таким чином, історизм - це дієвий засіб обґрунтування нових знань, один із способів формування наукового світогляду учнів.

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, oleksa.koropov@gmail.com

ВПЛИВ ЕНЕРГІЙ МІГРАЦІЙ ВАКАНСІЙ КОМПОНЕНТІВ СПЛАВУ НА ЕФЕКТИ РАДІАЦІЙНО-ІНДУКОВАНОЇ СЕГРЕГАЦІЇ В АУСТЕНІТНИХ СПЛАВАХ Fe-Cr-Ni

Явище, яке в металевих сплавах під дією опроміненням призводить до збіднення або збагачення головних, домішкових чи легуючих елементів поблизу стоків точкових дефектів

(ТД) [1-6] називається *радіаційно-індукованої сегрегацією* (РІС). Як показують розрахунки, значення поверхневих концентрацій Cr C_{Cr}^{surf} та нікелю Ni C_{Ni}^{surf} в сплавах Fe-Cr-Ni найбільш суттєво залежить від енергій міграції вакансій компонентів сплаву $E_{k,v}^{m}$ ($k=\mathrm{Cr,Ni,Fe}$, v – вакансії) [3, 5]. Метою даної роботи є порівняння результатів моделювання РІС в аустенітних сплавах Fe-Cr-Ni при різних значеннях енергій міграції вакансій компонентів сплаву.

Енергія міграції ТД у сплавах Fe-Cr-Ni залежить від співвідношення елементів, тобто від концентрацій C_{Fe}, C_{Cr}, C_{Ni} [3, 6]. Наприклад, для трикомпонентних аустенітних сплавів Fe-Cr-Ni, які мають ГЦК ґратку, вираз для обчислення енергії міграцій вакансій Cr можна записати у вигляді [3]

$$
\begin{aligned}
E_{\mathrm{Cr},v}^{m} &= C_{\mathrm{Cr}}\left[E_{pure\,\mathrm{Cr},v}^{m}-3\left(E_{\mathrm{Cr},bcc}^{coh}+G_{\mathrm{Cr}}^{bcc\to fcc}\right)-E_{\mathrm{Cr},v}^{f}\right]\\
&+C_{\mathrm{Ni}}\left[\frac{1}{2}E_{pure\,\mathrm{Ni},v}^{m}-\left(\frac{2}{Z}+1\right)E_{\mathrm{Ni}}^{coh}-\frac{2}{Z}\left(E_{\mathrm{Cr},bcc}^{coh}+G_{\mathrm{Cr}}^{bcc\to fcc}\right)+ZE_{\mathrm{NiCr}}^{ord}-E_{\mathrm{Ni},v}^{f}\right]\\
&+C_{\mathrm{Fe}}\left[\begin{array}{l}\frac{1}{2}E_{pure\,\mathrm{Fe},v}^{m}-\left(\frac{2}{Z}+1\right)\left(E_{\mathrm{Fe},bcc}^{coh}+G_{\mathrm{Fe}}^{bcc\to fcc}\right)\\ -\frac{2}{Z}\left(E_{\mathrm{Cr},bcc}^{coh}+G_{\mathrm{Cr}}^{bcc\to fcc}\right)+ZE_{\mathrm{FeCr}}^{ord}-E_{\mathrm{Fe},v}^{f}\end{array}\right]\\
&+C_{v}\left[E_{\mathrm{Cr},bcc}^{coh}+G_{\mathrm{Cr}}^{bcc\to fcc}+E_{\mathrm{Cr},v}^{f}\right]+\frac{1}{2}E_{pure\,\mathrm{Cr},v}^{m}+3\left(E_{\mathrm{Cr},bcc}^{coh}+G_{\mathrm{Cr}}^{bcc\to fcc}\right)\\
&+\frac{3}{2}E_{\mathrm{Ni}}^{coh}+\frac{3}{2}\left(E_{\mathrm{Fe},bcc}^{coh}+G_{\mathrm{Fe}}^{bcc\to fcc}\right)+E_{\mathrm{Cr},v}^{f}+\frac{1}{2}E_{\mathrm{Ni},v}^{f}+\frac{1}{2}E_{\mathrm{Fe},v}^{f}.
\end{aligned}
$$

Вирази для енергій міграції вакансій Ni та Fe мають аналогічний вигляд.

На рис. 1 наведено значення збіднення Cr $\Delta C_{\mathrm{Cr}}=C_{\mathrm{Cr}}^{0}-C_{\mathrm{Cr}}^{surf}$ та збагачення Ni $\Delta C_{\mathrm{Ni}}=C_{\mathrm{Ni}}^{surf}-C_{\mathrm{Ni}}^{0}$ для сплавів Fe-xCr-8Ni при енергіях міграцій вакансій E_{v}^{m}, взятих для сплаву Fe-20Cr-8Ni та розрахованих для кожного сплаву при $x=19;\,19{,}5;\,20{,}5;\,21$. Зовнішні параметри прийняті наступними: $T=350$ °C, $K_0=10^{-6}$ зна/с, $D=10$ зна.

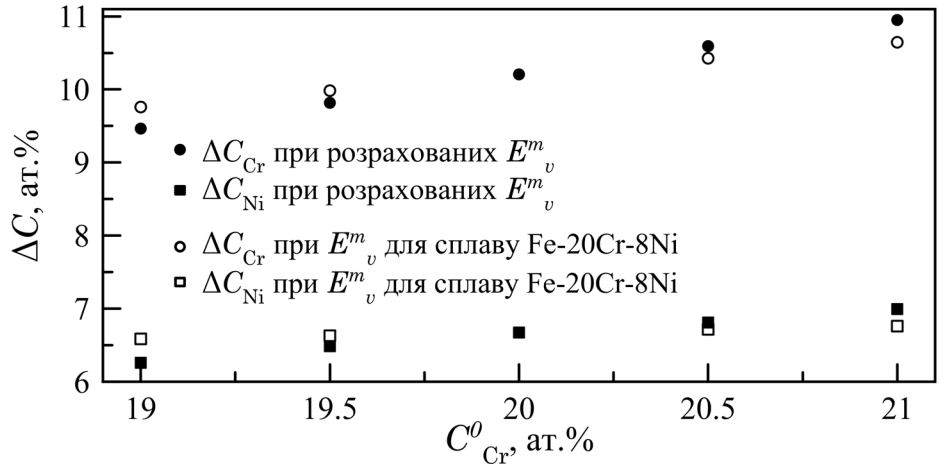


Рис. 1. Значення збіднення Cr та збагачення Ni для сплавів Fe-xCr-8Ni при енергіях міграцій вакансій для сплаву Fe-20Cr-8Ni та розрахованих для кожного сплаву при x=19; 19,5; 20,5; 21.

Список використаних джерел

1. Коропов О.В., & Скороход Р.В. (2021). Диференціальні рівняння радіаційно-індукованої сегрегації в N-компонентних концентрованих металевих стопах. *Матеріали IX Міжнар. наук.-практ. конф. «Математика в сучасному технічному університеті»,* Київ, 28-29 грудня 2020 р. (с. 80-89). Вінниця: Видавець ФОП Кушнір Ю.В., 2021.
2. Скороход, Р. В., & Коропов, О. В. (2020). Математична модель радіаційно-індукованої сегрегації в концентрованих металевих сплавах Fe-Cr-Ni. *У матеріалах VIII Міжнар. наук.-практ. конф. «Математика в сучасному технічному університеті»*, Київ, 27–28 грудня 2019 р. (с. 153-160). Вінниця: Видавець ФОП Кушнір Ю. В., 2020.
3. Allen T.R., & Was G.S. (1998). Modeling radiation-induced segregation in austenitic Fe–Cr–Ni alloys. *Acta Mater*., 46. (10), 3679-3691. doi: 10.1016/S1359-6454(98)00019-6
4. Ardell A.J., & Bellon P. (2016). Radiation-induced solute segregation in metallic alloys. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*., 20(3), 115-139. doi: 10.1016/j.cossms.2015.11.001
5. Skorokhod R.V., & Koropov A.V. (2019). Modeling of Radiation-Induced Segregation in Fe–Cr–Ni Alloys. *Physics of the Solid State*., 61, 2269–2276. doi: 10.1134/S1063783419120515
6. Was G.S. (2017). *Fundamentals of Radiation Materials Science: Metals and Alloys* (2nd ed.). New York: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-1-4939-3438-6

Тимошенко О.В.
кандидат технічних наук, доцент,
Бабак А.М.
кандидат технічних наук, доцент,
Кравченко В.В.
студент, спеціальність «131 Прикладна механіка»
Новосад А.А.
старший викладач
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна
victorkravchenko611@gmail.com

МОДЕРНІЗАЦІЯ ВУЗЛА КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОГО МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ В КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛАХ

Останнім часом прогрес стрімко росте і внаслідок цього відбувається розробка нових полімерних і композиційних матеріалів з широким спектром використання в галузях машинобудування, будівництва та інші. У зв’язку з цим виникає необхідність дослідження механічних характеристик нових матеріалів за спрощеною методикою. Модуль пружності – одна з основних механічних характеристик, що необхідна для розв’язання більшості інженерних задач. Для визначення модуля пружності існує два основних методи: статичний та динамічний, який у свою чергу можна розділити на резонансний та імпульсивний [1, 2].

У роботі розглядали знаходження модуля пружності резонансним методом. Для цього методу існує два підходи, які відрізняються умовами закріплення. Для установки було обрано закріплення, при якому зразок підвішується на пружних мідних дротах діаметром 0,15 мм. Блок-схема установки, на якій проводилось дослідження наведена на рис. 1. З генератора частот 1 подається сигнал на випромінювальний перетворювач 2, де він перетворюється на механічні коливання, що збурюють зразок 3. Приймальний перетворювач 4 вловлює коливання зразка 3, та перетворює їх на електричний сигнал, що передається на підсилювач 5. Після підсилення сигнал подається на осцилограф 6, що фіксує частоту коливання [3].

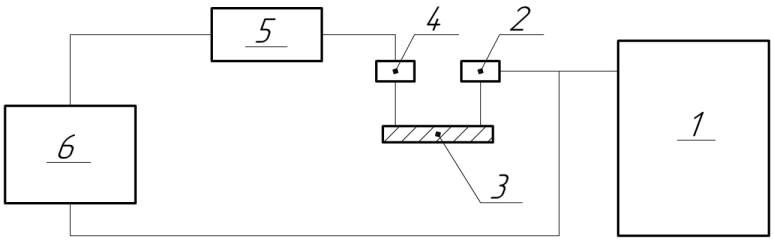


Рис. 1 Схема стенда для визначення динамічного модуля пружності, де 1 – генератор частот; 2 – випромінювальний перетворювач; 3 – зразок; 4 – приймальний перетворювач; 5 – підсилювач сигналу; 6 – осцилограф

В якості матеріалу для досліджуваних зразків були обрані сталь 20 (рис. 2а) та композитна скловолоконна арматура (рис. 2б). Зразки мають круглий поперечний переріз та гладку поверхню, для надійного закріплення мідним дротом.

а) б)

Рис. 2 Досліджувані зразки

Для визначення модуля пружності першого роду E за поперечними коливаннями для круглого поперечного перерізу використовується наступна формула:

$$E = 1,6388 \cdot 10^{-8} \left(\frac{l}{d} \right)^4 \frac{m}{l} f_{\text{рез}}^2,$$

де $f_{\text{рез}}^2$ – резонансна частота першої форми поперечних коливань зразка; l – довжина зразка; d – діаметр зразка; m – маса зразка.

Для порівняння статичного та динамічного модулів Було проведено ряд експериментальних досліджень. Результати наведено у таблиці 1.

Таблиця 1.

Порівняння модулів пружності

Назва матеріалу	$E_{статичний}$, ГПа	$E_{динамічний}$, ГПа
Сталь 20	213	217
Скловолоконна композитна арматура	40,5	41,8

Отже, за результатами дослідження, ми отримали значення динамічного модуля пружності першого роду E для двох матеріалів. Як видно із результатів, динамічний модуль пружності дає вищі результати, та різниця між значеннями модулів становить менше 5 %.

Список використаних джерел

1. Майборода В.С., Мініцька Н.В. Фізичні основи руйнування матеріалів // Навчальний посібник для студентів напряму підготовки 6.050503 "Машинобудування" – Київ, 2012 – 152 с.

2. Писаренко, Г. С. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела / Г. С. Писаренко, В. А. Стрижало ; ИПП НАНУ. — Киев: Наук. думка, 2018. — 431 с.

3. ASTM E1876-22 - Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration

Тимошенко О. В.
кандидат технічних наук, доцент,
Мусієнко О. С.
асистент,
Нєхороших М. В.
студент, спеціальність «131 Прикладна механіка»,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
м.Київ, Україна
m.niekhoroshykh.mp91@kpi.ua

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ МОДЕЛЕЙ МАКСВЕЛЛА ТА КЕЛЬВІНА-ФОЙГТА

Сучасне літако- та суднобудування характеризується ширшим застосуванням композитних матеріалів[1]. Серед композитів у свою чергу важливе місце посідають матеріали з полімерними матрицями або з високомодульними органічними полімерними волокнами [2]. Застосування полімерів зумовлене в першу чергу їх унікальними фізико-механічними властивостями, які можна отримати варіюючи хімічний склад полімеру.

Для розрахунку полімерних конструкцій необхідно знати механічні характеристики матеріалів, що визначаються за допомогою експерименту [3]. Тому актуальним лишається питання вдосконалення процесу та зменшення часу аналізу експериментальних даних.

В'язко-пружні властивості полімеру характеризуються кривими повзучості та релаксації матеріалу, що визначаються експериментально. З іншого боку ці процеси описуються аналітично узагальненими моделями відповідно Кельвіна-Фойгта та Максвелла. Згідно з цими моделями функції повзучості та релаксації виражаються наступними залежностями:

$$I(t) = \sum_{i=1}^{n} I_i \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda_i}\right)\right], \quad (1)$$

$$E(t) = \sum_{i=1}^{n} E_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right), \quad (2)$$

де I_i – податливість і-го елемента, λ_i – час запізнення і-го елемента, E_i – миттєвий модуль пружності і-го елемента, τ_i – час релаксації і-го елемента.

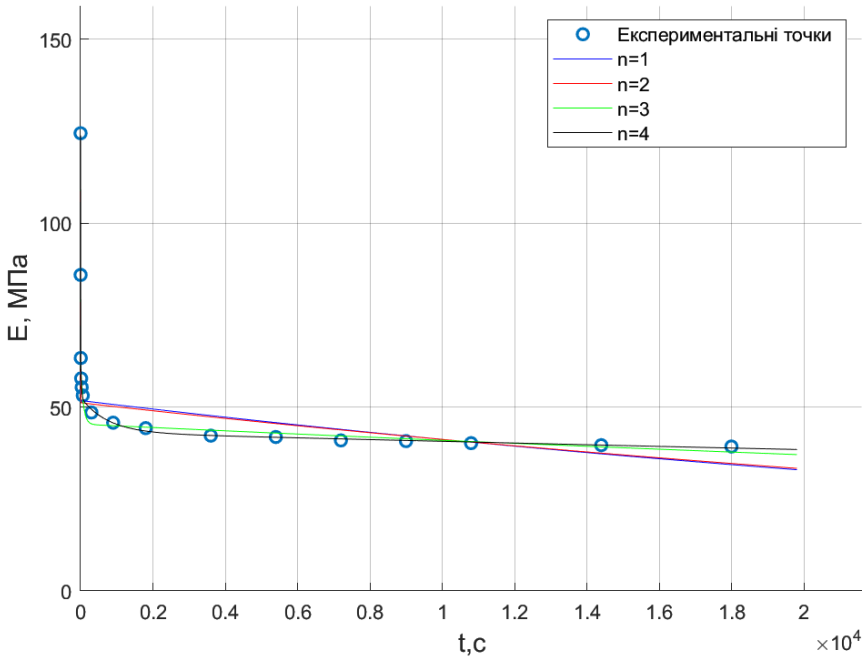


Рис. 1. Отримані функції релаксації для моделей Максвелла з різною кількістю членів

Зазначені коефіцієнти знаходять графічними методами, наприклад, методом покрокового виділення експонент. Типові підходи дають задовільний результат, проте є трудомісткими. У даній роботі розглядається визначення коефіцієнтів функцій повзучості та релаксації за допомогою нелінійного методу найменших квадратів. Реалізація цього методу відбувалась за допомогою алгоритму Левенберга–Марквардта (LMA) в системі MATLAB. В результаті роботи було створено програму, яка дозволяє визначити коефіцієнти функцій повзучості та релаксації для довільних наборів експериментальних даних (рис 1).

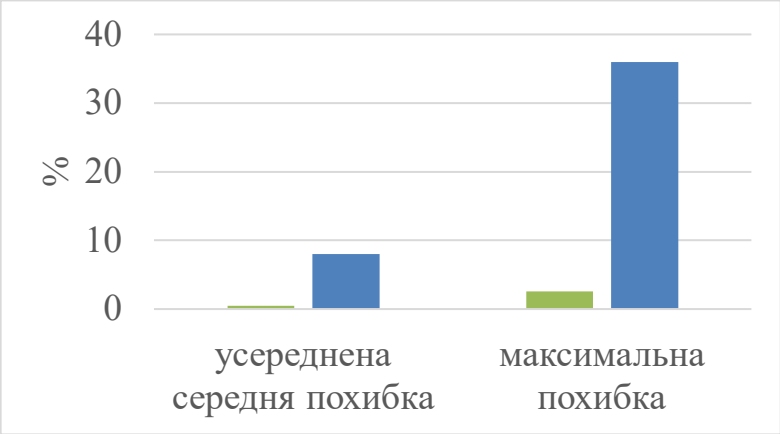


Рис. 2. Похибки графічного та аналітичного методу визначення коефіцієнтів (зеленим позначено результати аналітичний методу, синім – графічного)

Список використаних джерел

1. Laszlo P. Kollar., George S. Springer. Mechanics of composite structures : Cambridge University Press, 2003. 480 p.

2. Васильев В. В. Механика конструкций из композитных материалов. М: Машиностроение, 1988. 272 с.

3. Нові матеріали. Частина І: Міцність і деформування полімерних та композиційних матеріалів при короткочасному навантаженні. Лабораторний практикум: навч. посіб. / Шидловський М.С. та ін. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 81 с.

Фам Д. К.
кандидат технічних наук, доцент,
Мусієнко О. С.
асистент,
Демешко Я.В.
студент, спеціальність «131 Прикладна механіка»
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна
demeshko.yaroslav.01@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ ЖОРСТКОСТІ АПАРАТУ ІЛІЗАРОВА ПРИ РІЗНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ ЗА ДОМОПОГОЮ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

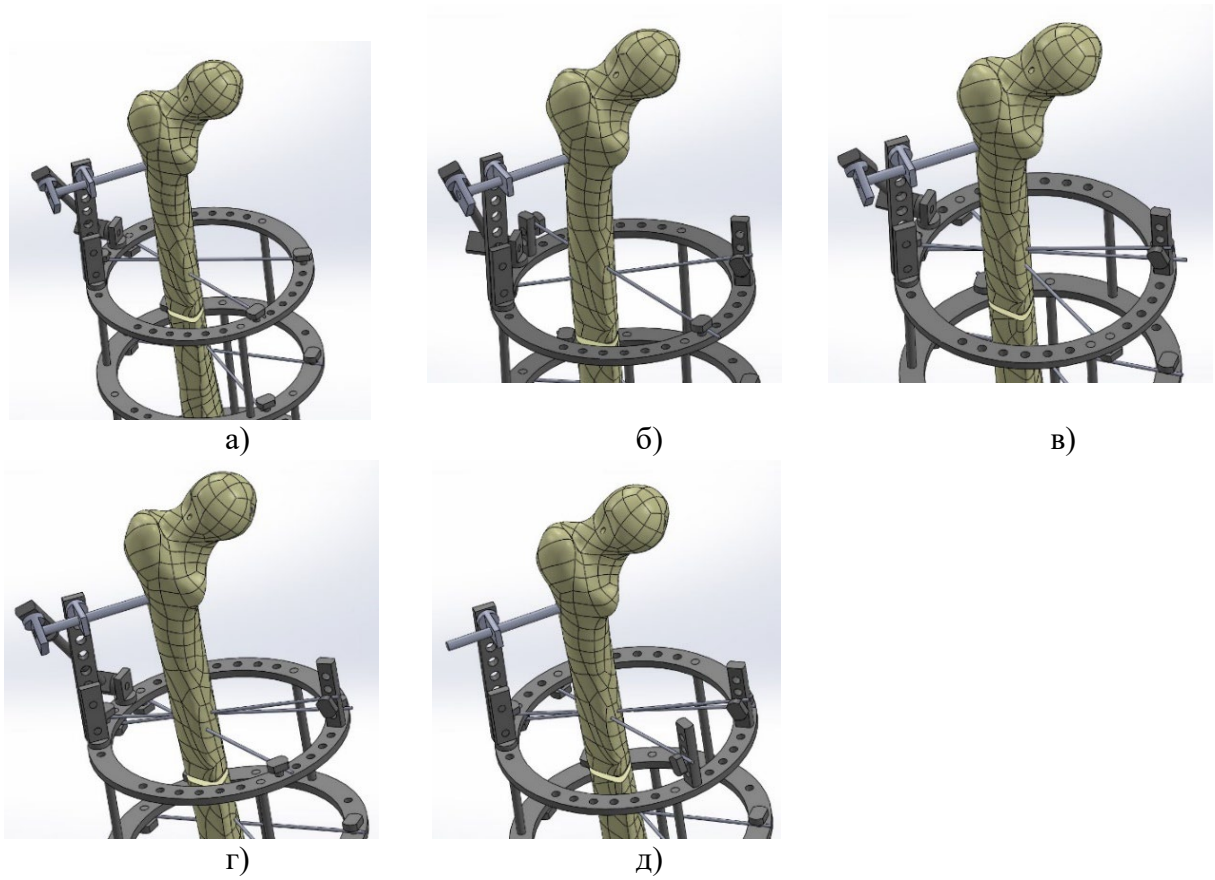
На сьогоднішній день існує багато біомеханічних систем зовнішньої фіксації, що використовуються для фіксації переломів довгих кісток. Однак залишається багато теоретичних і практичних питань по визначенню оптимальної конструкції кільцевих фіксаторів для забезпечення максимальної жорсткості системи «апарат фіксації -уламки

кістки». Це питання є досить актуальним, бо якість зрощення переломів напряму залежить від жорсткості апарату зовнішньої фіксації (АЗФ).

В даній роботі розглядався АЗФ Ілізарова, модель якого була створена за допомогою системи автоматизованого проектування SolidWorks. Для оцифрування кістки було використано дані зі знімків комп'ютерної томографії. Всі інші елементи моделювались згідно з кресленнями. В цій роботі було досліджено 5 конфігурацій даного АЗФ (рис. 1). Далі наведено детальний опис положення спиць на верхньому кільці кожної конфігурації:

- конфігурація «а» має дві спиці розташовані в одній площині (рис. 1 а); конфігурація «б» має дві спиці розташовані під кутом до площини кільця (рис. 1 б); конфігурація «в» має три спиці, дві з яких розташовані під кутом, одна у площині кільця (рис. 1 в); конфігурація «г» має три спиці, дві з яких розташовано в площині кільця, одну під кутом (рис. 1 г); конфігурація «д» має три спиці, дві з яких розташовані під кутом, одна у площині кільця, проте прибрано плече жорсткості (рис. 1 д).

-



а) б) в)

г) д)

Рис. 1 Конфігурації апарату Ілізарова

Дослідження проводилось у програмному комплексі Ansys Workbench. Під час випробування було реалізовано 4 види навантаження: стиск на головку кістки, стиск вздовж осі кістки, згин поперек площини стержнів та кручення. Критерієм оцінки жорсткості системи є переміщення точки прикладання сили в напрямі її дії. Чим менше переміщення – тим більша жорсткість, тим краще зафіксована кістка та перелом швидше зрощується.

Значення жорсткостей систем при різних видах навантаження наведено на рис. 2.

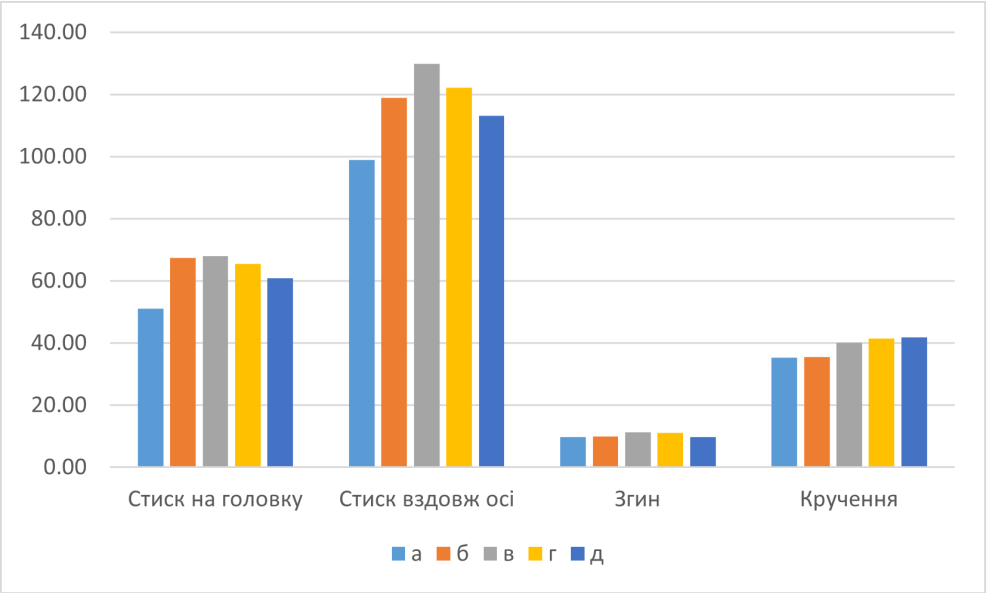


Рис. 2 Діаграма порівняння жорсткостей

За результатами дослідження створена імітаційна скінченно-елементна модель «апарат зовнішньої фіксації - уламки кістки», що може використовуватись в подальших дослідженнях конструкції фіксаторів. Виявлено, що конфігурація «в» має найбільшу жорсткість з усіх запропонованих варіантів.

Фам Д. К.
кандидат технічних наук, доцент,
Мусієнко О. С.
асистент,
Ребристий Д.І.
студент, спеціальність «131 Прикладна механіка»
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна
danilreb23@gmail.com

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ БІОМЕХАНІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЖОРСТКОСТІ МОДІФІКОВАНИХ ФІКСАТОРІВ

При травматичних переломах кісток у більшості випадків для лікування використовується апарат Ілізарова, через свою доведену ефективність. Але не зважаючи на свої переваги, інклюзивність травм мають місце випадки, коли кістки сильно пошкоджені, тому використання звичайного апарату не є достатньо ефективним. Більшість лікарів емпірично підбирають лікування змінюючи конструкцію, спираючись лише на клінічні спостереження. Це дає основу до проведення біомеханічного дослідження з метою визначення жорсткості фіксаторів.

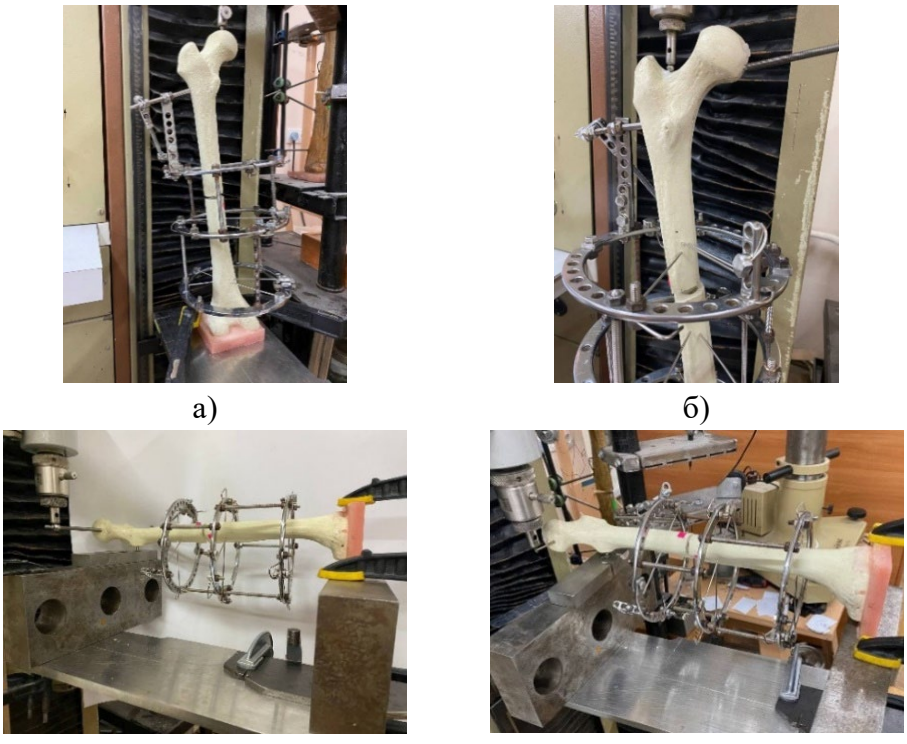
В роботі досліджувались модифіковані капкани Ілізарова, що наведені на рис. 1.

а б

Рис. 1. Зовнішній вигляд апарату: а – вид збоку; б – спереду

Дослідження модифікованих апаратів дозволить обґрунтовано підходити до вибору оптимальної конструкції. Розглядались 5 конфігурацій даного капкану: 1 конфігурація - дві спиці розташовані в одній площині; 2 конфігурація має дві спиці розташовані під кутом до площини кільця; 3 конфігурація складалась з трьох спиць, дві з яких розташовані під кутом, одна у площині кільця; 4 конфігурація має три спиці, дві з яких розташовано в площині кільця, одну під кутом; 5 - має три спиці, дві з яких розташовані під кутом, одна у площині кільця, проте прибрано плече жорсткості.

Системи випробували при чотирьох видах навантаження: стиск на головку кістки, стиск вздовж осі кістки, згин поперек площини стержнів, кручення.



а) б)

в) г)

Рис. 2. Види навантаження: а – стиск на головку кістки; б – стиск вздовж осі кістки; в – згин поперек площини стержнів; г – кручення.

Результати жорсткості наведено в табл. 1.

Таблиця 1.

Порівняння жорсткостей систем при різному просторовому розміщенні стрижнів за дії різних видів навантажень (Н/мм)

№ схеми	Стиск		Згин	Кручення
	На головку кістки	Вздовж осі кістки		
1	37,3	66,7	0,96	1,41
2	30,2	71,3	1,05	1,36
3	44,7	76,3	1,19	1,52
4	44,3	67,1	0,93	1,48
5	41,8	69,8	0,91	1,46

За результатами дослідження встановлено, що найбільшу жорсткість має система № 3. При збільшенні кількості спиць та розташування спиць під кутом збільшується жорсткість системи. Ребро жорсткості впливає на жорсткість всієї системи.

Федів В. І.
доктор фізико-математичних наук, професор
Олар О. І.
кандидат фізико-математичних наук, доцент
Бірюкова Т. В.
кандидат технічних наук, доцент
Буковинський державний медичний університет
м. Чернівці, Україна
vfediv@ukr.net, elena.olar@ukr.net, tanokbir@ukr.net

ОСОБЛИВОСТІ ВИКЛАДАННЯ ПРИРОДНИЧИХ ДИСЦИПЛІН ДЛЯ ЗДОБУВАЧІВ МЕДИЧНОЇ ОСВІТИ

Підготовка здобувачів освіти напрямків підготовки не пов’язаних безпосередньо з природничою освітою, в навчальному плані яких присутні дисципліни природничо-математичного профілю завжди спряжена з проблемами мотивації студентів до їх вивчення та підбором викладачами цих напрямків оптимальних методів та інструментів викладання з одночасним чітким усвідомленням своєї ролі в структурі підготовки фахівця відповідного напрямку. Проблеми мотивації студентів, у першу чергу, пов’язуються з нерозумінням необхідності відповідних знань у майбутній сфері діяльності та недостатнім рівнем знань отриманих з відповідних дисциплін у закладах середньої освіти. Рішення даної проблеми потребує не тільки пошуку оптимального розв’язку, а також його випробування і підтвердження ефективності.

Для студентів напрямку підготовки «Охорона здоров’я» однією з таких дисциплін є «Медична та біологічна фізика». Викладачі медичних ЗВО одностайні у висновках щодо невеликого відсотка здобувачів медичної освіти першого курсу, які розуміють необхідність знань та вмінь в їхній майбутній професійній діяльності, які належать до комплексу природничої підготовки. Тому, на наш погляд, основним завданням викладача дисциплін природничого профілю є акцентування уваги здобувачів освіти на встановленні конкретних причинно-наслідкових зв’язків у медицині за допомогою відповідних знань щодо кожної

теми даної дисципліни. І тим самим підкреслюючи, що природничі дисципліни є фундаментом для якісного клінічного мислення [1, с. 443], [2, с.326].

Сучасна медицина розвивається завдяки науково-технічному прогресу та розвитку новітніх інформаційно-комунікаційних технологій та технологій штучного інтелекту, які, безперечно, ґрунтуються на досягненнях інформаційних та математично-природничих наук. І хоча змінюються зовнішній вигляд та габарити медичного обладнання та способи передачі отриманої інформації, інваріантними залишаються закономірності поведінки фізичних чинників у живих системах, змінюється лише точність зареєстрованих результатів, отриманих після їх взаємодії. Тому завданнями викладачів дисциплін природничого профілю є максимально повне використання педагогічних інструментів і методів у поєднанні із сучасними технологіями моделювання та експерименту, що стане основою для усвідомлення ролі та місця природничих наук у комплексі медичних дисциплін.

Список використаних джерел

1. Пайкуш М.А. Природничонаукова складова в контексті формування цілісної системи знань майбутнього лікаря. *Педагогіка формування творчої особистості у вищій і загальноосвітній школах.* 2018, Вип. 58-59 (111-112), 438-447.
2. Яковишена Л.О. Інтеграція фундаментальної та фахової підготовки майбутніх молодших медичних спеціалістів у процесі вивчення природничонаукових дисциплін. Педагогічні науки: : теорія, історія, інноваційні технології. Суми, 2019. № 7(91). С.324–336.

Федів В. І.
доктор фізико-математичних наук, професор
Олар О. І.
кандидат фізико-математичних наук, доцент
Бірюкова Т. В.
кандидат технічних наук, доцент
Буковинський державний медичний університет
м. Чернівці, Україна
vfediv@ukr.net, elena.olar@ukr.net, tanokbir@ukr.net

ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ПРОБЛЕМНО-ОРІЄНТОВАНОГО НАВЧАННЯ ПРИ ПІДГОТОВЦІ СТУДЕНТІВ-МЕДИКІВ

Формування професійних компетентностей майбутніх лікарів починається з перших днів навчання у медичному ЗВО. Однією з базових дисциплін у системі підготовки студентів-медиків є медична та біологічна фізика. Дисципліна є підґрунтям для вивчення багатьох фахово-орієнтованих дисциплін студентами на старших курсах. Тому дуже важливо на першому курсі закласти фундамент для їх вивчення. Студенти-першокурсники мають різну якість базової шкільної освіти, тобто необхідно проводити заняття таким чином, щоб вони мали змогу розуміти матеріал, не замикались у собі, виявляли інтерес до предмета та бажання оволодівати новими знаннями для свого майбутнього професійного зросту. Працюючи в цьому напрямку на кафедрі біологічної фізики та медичної інформатики БДМУ широко використовуються різні методи для стимулювання студентів до навчання. Один з таких методів - використання елементів проблемно-орієнтовного навчання [1, с. 27], [2, с.43]. Студенти вдома готуються до заняття, розв'язують задачі, виконують завдання, готують відповіді не тільки на запитання з конспекту, а й на запитання професійно-орієнтовні. Під час проведення заняття в аудиторії обговорюються питання

теоретичного характеру, відбувається звірка розв'язання задач, а також обговорення професійно-орієнтованих питань. Для підготовки відповідей на останні необхідно використовувати додаткові ресурси пошуку інформації, наприклад, інтернет. У ході дискусії, яка здійснюється на занятті, студенти під керівництвом викладача знаходять правильні відповіді. Студенти із задоволенням беруть участь у проведенні заняття такого формату. В неформальній обстановці, коли всі задіяні до обговорення і не бояться висловлювати свою думку, навіть, якщо вона не завжди абсолютно вірна, вони вчаться відстоювати свою точку зору, бути комунікабельними, активними. В результаті, заняття мають цікавий формат, підвищують зацікавленість до предмету і процесу навчання в цілому, стимулюють студентів до саморозвитку.

Список використаних джерел

1. Горяча Л. О., Прокопенко Т. С., Коломієць І. В. Актуальність впровадження проблемно-орієнтованого підходу в систему фахової вищої освіти. Управління, економіка та забезпечення якості в фармації, 2018, № 3 (55), 26-32.
2. Хламанова Л.І., Чайковський Ю.Б. Проблемно-орієнтоване навчання у вищій медичній освіті. *Медична освіта*, 2019, (1), 41–47. https://doi.org/10.11603/me.2414-5998.2019.1.10057

Хелемеля О. В.,
кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник;
Лебединський С. О.,
кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник;
Холодов Р.І.,
доктор фізико-математичних наук., член кореспондент НАН України, в.о. директора
Інститут прикладної фізики НАН України,
м. Суми, Україна,
oleksiikhel@gmail.com

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ АЛГОРИТМІВ PIC В ЗАДАЧАХ ПОЛЬОВОЇ ЕМІСІЇ

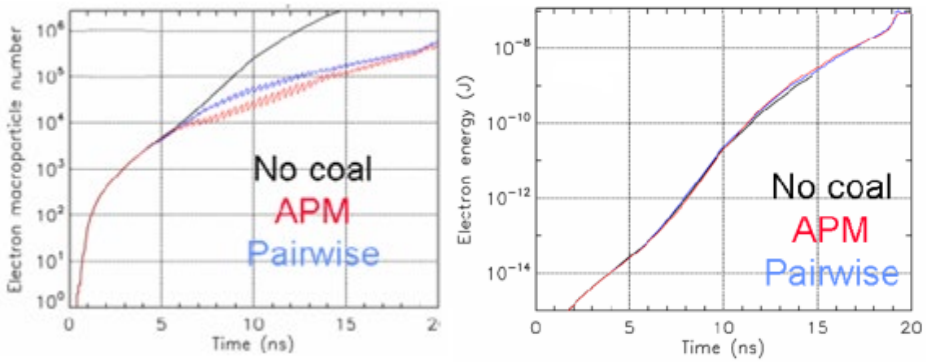
Моделювання процесів методом PIC польової емісії та пробоїв має свою специфіку, оскільки маємо справу з джерелами частинок, наприкдлад, іонізація, емісія з кордонів тощо. При цьому загальна кількість частинок може зростати експоненціально. Проблеми, пов'язані з просторовим розширенням динамічної плазми, можуть призвести до статистичного заниження розподілу частинок у критичних областях.

Для вирішення проблем експоненціального росту розрахунку використовуються наступні підходи: метод попарного злиття або адаптивний алгоритм для числа частинок (APM, Adaptive Particle Management)

В методі попарного злиття відшукуємо частинки, імпульси яких відповідають заданому допуску в даній комірці. Дві частинки об’єднуються в одну частинку із усередненими по масі положенням і імпульсом. Глобальний заряд, маса та імпульс точно зберігаються; однак невеликі поправки для збереження локального заряду повинні бути внесені в електромагнітне моделювання. Закон збереження визначається обраним допуском і обов’язково призводить до охолодження, оскільки простір швидкостей стискається [1].

В методі APM основні величини, такі як заряд, імпульс і енергія, зберігаються глобально та локально. Алгоритм передбачає оптимізацію фазового простору частинок всередині комірки за рахунок розміщення (перестворення) нових частинок у більш

густонаселених областях цього простору. Крім того, збереження імпульсу та енергії забезпечується таким чином, що розподіл швидкостей «нових» частинок наближається спеціальними процедурами до початкового набору [2].



а) б)

Рис.1. Результати моделювання 2D плазми методами: чорний – прямий метод, червоний – адаптивний алгоритм, синій – алгоритм попарного злиття [2]

Метод АРМ вважається оптимальним для моделювання процесів зі змінним числом частинок. При цьому виконуються закони збереження.

Список використаних джерел

1. G. Lapenta, J. U. Brackbill, J. Comp. Phys. 115, 213-217 (1994)
2. Welsh_D. Adaptive Particle Management in a Particle-in-Cell Code

Щербак М.О.
магістрант, спеціальність «014 Середня освіта (Фізика)»,
Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка,
м. Суми, Україна
margaruta26@gmail.com

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ОРГАНІЗАЦІЇ ТА ПРОВЕДЕННЯ УРОКІВ З ФІЗИКИ В ОСНОВНІЙ ШКОЛІ

Освітня політика розвинутих країн акцентує увагу на розвиткові особистості, її якостей, талантів і здібностей. Сучасний підхід до освітнього процесу в закладах загальної середньої освіти України має низку суттєвих ознак. Він є компетентнісним, діяльнісним та особисто зорієнтованим. Саме для впровадження такого підходу використовується весь арсенал технологій навчання. Серед основних завдань, які слід вирішити, щодо впровадження сучасних інноваційних технологій в освітній процес, є пошуки шляхів інтеграції в традиційні освітні технології нових сучасних[1].

Результати навчання шкільної програми з фізики залежать від творчої активності учнів на уроках, їх здатності мислити, обґрунтовувати свої думки, здатності до комунікації. Адже, відомо, що найбільш цінними є здобутки, отримати власною працею. Отже учитель повинен спонукати учнів до активної навчальної пізнавальної діяльності. Одним із шляхів досягнення цього є використанням інноваційних освітніх технологій. Серед них слід виділити технології розвивального навчання, навчання як дослідження, інтерактивне навчання тощо[2].

Так, використання інтерактивних технологій на уроках фізики дозволяє забезпечити глибину вивчення матеріалу. Учні опановують усі рівні пізнання, стають більш активними, вчаться самостійно приймати рішення. Проте до кожного виду діяльності учнів треба готувати. Це стосується впровадження інтерактивних методів.У своїй практиці я використовую такі як «Мікрофон», «Незакінчене речення», «Мозковий штурм», «Броунівський рух», «Ажурна пилка», «Коло ідей», «Метод ПРЕС».

Так на уроці за темою: «Два способи зміни внутрішньої енергії» проводимо фронтальний дослід.

Фронтальний дослід: візьміть скріпку та декілька разів швидко випряміть та зігніть її кілька разів. Доторкніться до місця згину.

1. Що відбувається?
2. Чому?
3. Що називається внутрішньою енергією?
4. Які існують способи зміни внутрішньої енергії?
5. Наведіть приклади явищ, коли внутрішня енергія змінюється в процесі теплопередачі.
6. Наведіть приклади явищ, за яких внутрішня енергія змінюється в процесі роботи.

Використовуємо «Мозковий штурм». Учні активно включаються в колективне обговорення, вільно висловлюють свої думки і так іде пошук правильного рішення. Як показує практика, шляхом «мозкового штурму» всього за декілька хвилин можна отримати десятки цікавих ідей, викликати дискусію. А, отже, активізувати пізнавальну діяльність учнів на уроці.

Список використаних джерел

1. Кравчук О.М. – Використання інноваційних технологій на уроках фізики: метод. реком.: Вінниця 2021 URL: https://naurok.com.ua/vikoristannya-innovaciynih-tehnologiy-na-urokah-fiziki-246977.html.

2. Кіча Р.І. – Інноваційні технології – запорука успішного викладання фізики у сучасній школі: Генезум 2020 URL: https://genezum.org/library/innovaciyni-tehnologii--zaporuka-uspishnogo-vykladannya-fizyky-u-suchasniy-shkoli

Profatilova I.
Research Engineer FREIA laboratory, Department of Physics and Astronomy, Uppsala University
Uppsala, Sweden
iaroslava.profatilova@physics.uu.se

EFFECT OF PULSE WIDTH ON THE BREAKDOWN RATE AT PULSED DC SYSTEM

Electrical breakdown phenomenon in a vacuum actively studying during last hundred years as well as effect of different parameters on it, such as a shape of high voltage pulses, repetition rate, a pulse width, test algorithms and etc. The result from the test with a difference pulse width made at CERN's pulsed DC system is presented here.

High gradient RF tests of accelerating structures for CLIC (Compact Linear Collider) project showed a good agreement with next scaling law in a range from 50 ns to 250 ns [1]:

$$BDR \propto E^{30}\tau^{5}, (1)$$

Where BDR is breakdown rate [1], E – electric field, τ – pulse width.

[1] BDR is probability of breakdowns counted as number of breakdowns divided by number of applied pulses.

In order to investigate the validity of eq. 1 for the DC case, the BDR vs pulse width dependency measured at pulsed DC system [2,3] at CERN (European Organization for Nuclear Research). The test with different pulse width has been made previously at pulsed DC system with long fall time of high voltage pulse [4] or in a small pulse width range [5]. A new high voltage generator at CERN based on Marx circuit allows to make a test in the wide range of pulse widths. As the high voltage pulses applied from the generator have the comparable small rise and fall times [3], the pulse has a square shape and it is considered as a similar to RF pulse.

Two kinds of copper samples are used at this test: chemically cleaned (so-called hard Cu), and additionally heated (so-called soft Cu). The soft Cu electrodes were followed the same temperature treatment as accelerating structure during bonding (up to 1040ºC at hydrogen atmosphere) and baking (up to 650ºC) cycles. The spacer for the gap distance of 60 µm was used.

Usually accelerating structures in RF test follow conditioning test, i.e. RF pulses started to apply with a low amplitude of electrical field and increased step by step in order to increase the level of electrical field where an electrical breakdown threshold is. This procedure helps to improve material resistance to electrical breakdown and reach much higher gradient. The same algorithm is implemented for testing electrodes in a pulsed DC system. As soon as electrodes (in DC case) or accelerating structures (in RF case) conditioned up to certain field, the BDR is reduces, i.e. it is conditioned over the time [1,3-5].

To prevent the effect of electrodes conditioning from the masking of the pulse width effect, the order of applied pulse widths was changing during our test: from low to high and opposite. The experiment procedure was as follows:

- the voltages for the tests were chosen to have the BDR in the range 10^{-4}– 10^{-8};
- the initial pulse width was set (for example, 500 ns);
- after certain number of pulses, the pulse width was changing by factor 2;
- the test was continued until the chosen range of pulse width was applied.

The pulse widths from 500 ns up to 128 µs or/and downwards were applied during these measurements. The average BDR for each pulse width was calculated. Fig. 1. shows the BDR vs pulse width in logarithmic scale for one of the tests. The results for several tests are shown in Table 1.

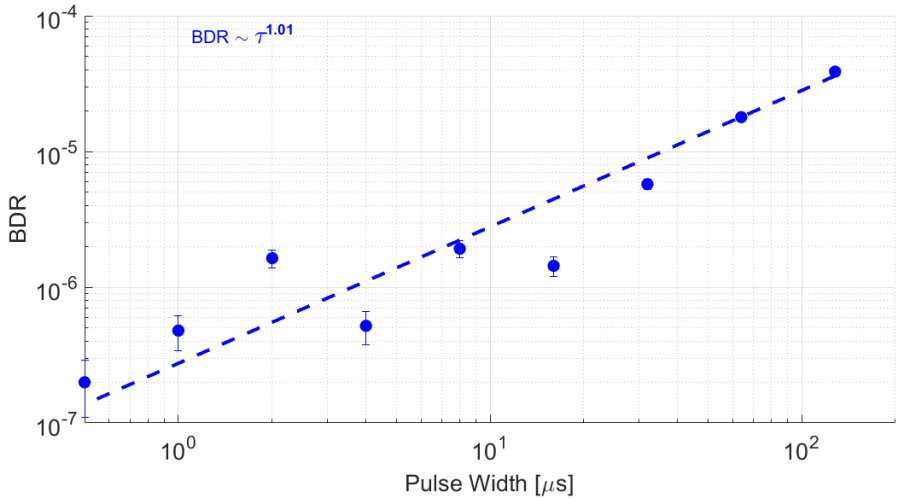


Fig. 1. BDR vs pulse width dependency for soft copper electrodes for the pulse width 500 ns – 128 µs. The applied voltage is 4500 V (75 MV/m).

Table 1.

The main parameters for the BDR vs pulse width dependency tests

No. test	Material	Range of pulse width [μs]	Order	Electrical field [MV/m]	Number of pulses per step	BDR range	Fitted power
1.	Hard Cu	0.5 - 64	up	79	~ 25 mln	5.3E-6 – 4.3E-5	0.42
2.	Hard Cu	0.5 - 128	down	74	~ 25 mln	4.0E-7 – 1.7E-5	0.82
3.	Hard Cu	0.5 - 128	up	74	~ 25 mln	2.4E-7 – 1.3E-5	0.8
4.	Soft Cu	0.5 - 128	up	75	~ 50 mln	2.8E-7 – 2.2E-5	0.4
5.	Soft Cu	0.5 - 128	down	75	~ 50 mln	2.0E-7 – 3.0E-5	0.63
6.	Soft Cu	0.5 - 128	down	75	~ 25 mln	2.0E-7 – 3.9E-5	1.01
7.	Soft Cu	0.5 - 128	up	75	~ 25 mln	3.5E-7 – 3.7E-5	0.84

The estimates for the different tests in a range from 500 ns to 128 μs show the power law dependency $BDR \propto \tau^x$ with x in the range from 0.4 to 1.01. The results of test with the copper parallel plate electrodes made at CERN showed smaller power for the tests with order of pulse width from higher to lower value.

References

1. A.Grudiev, S.Calatroni, and W.Wuensch, Phys. Rev. ST Accel. Beams 12 (102001) (2009).
2. Ia. Profatilova et al. Nucl. Instr. and Methods in Physics Research, A 953 (163079) (2020).
3. I. Profatilova, CERN-Proceedings-2017-001, CERN, Geneva, 2017.
4. N. Shipman, Ph.D. thesis, Manchester University, 2014.
5. L.M. Morales, M.Sc. thesis, University of Valencia, 2016.

Наукове видання

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ, ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ ТА МЕТОДИКИ НАВЧАННЯ ФІЗИКИ

М А Т Е Р І А Л И
VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю (Суми, 24-26 жовтня 2022 року)

(електронне наукове видання)

ISSN 2521-6996
Key title: Sučasnì problemi eksperimental'noï, teoretičnoï fiziki ta metodiki navčannâ fiziki
Abbreviated key title: Sučas. probl. eksp. teor. fiz. metod. navčannâ fiz.

Відповідальний за випуск: **Ворошило О. І.**
Комп’ютерний набір і верстка: **Лебединський С. О.**