

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

«Шарові композити для технологій радіаційного захисту»

«Layer composites for radiation protection technologies»

Виконав: здобувач денної форми навчання
спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього
середовища

Освітня програма Технології захисту навколишнього
середовища

Стовпеч Марк Віталійович _____

Керівник д.ф.-м.н., професор Герасимов О.І. _____

Рецензент к.ф.-м.н., доц. Худинцев М.М.

Рекомендовано до захисту:
Протокол засідання кафедри
екології та охорони довкілля
№ 9 від 13. 06. 2024р.

Завідувачка кафедри
_____ Чугай Ангеліна

Захищено на засіданні ЕК № _____
протокол № _____ від _____ . _____ . 20____ р.

Оцінка _____ / _____ / _____
Голова ЕК

_____ Мещеряков Володимир

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ____природоохоронний_____
Кафедра __ фізики та технологій захисту навколишнього середовища_____
Рівень вищої освіти бакалавр
Спеціальність 183 «Технології захисту навколишнього середовища»
(шифр і назва)
Освітня програма Технології захисту навколишнього середовища
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри фізики та
технологій захисту
навколишнього середовища,
професор Герасимов О.І.**

02_травня__2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

студенту_____Стовпецю Марку Віталійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи_Шарові композити для технологій радіаційного захисту

керівник роботи Герасимов Олег Іванович. д.ф-м. н., професор_____

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “20” грудня 2023 року №
272_ – «С»__

2.Строк подання студентом роботи__12.06.2024_____

3. Вихідні дані до роботи_____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Дослідити вплив радіаційного випромінювання на матеріали.

2. Проаналізувати фізичні властивості композитів

3. Описати приклад застосування шарових композитів на прикладі радіаційно-захисних корпусів для техніки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Таблиця 1.1 - Класифікація РАВ, що базується на критерії допустимості (недопустимості) їх поховання в сховищах різних типів. Рис. 2.1.

Класифікація композиційних матеріалів за матеріалом матриці. Таблиця 2.1 - Класифікація наповнювача формою. Рис. 3.1 - Конструкції корпусів для захисту ІМС

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Немає		

7. Дата видачі завдання 02.05.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Оцінка виконання етапу	
			у %	за 4-х бальною шкалою
1	Огляд базових літературних джерел за темою дипломного проекту	02.05.24 – 16.05.24	74	4 добре
2	Узагальнення основних теоретичних положень проекту	17.05.24- 26.05.24	74	4 добре
3	Рубіжна атестація	27-31.05.24	74	4 добре
4	Узагальнення отриманих результатів. Оформлення електронної версії роботи. Перевірка на плагіат. Складання протоколу та авторського договору	01.06.24	74	4 добре
		06.06.24		
5	Підготовка паперової версії і презентаційного матеріалу до процедури предзахисту. Внесення коректив. Рецензування роботи. Підготовка до публічного захисту.	07.06.24- 12.06.24	74	4 добре
	Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)		74	4 добре

Студент _____ Стовпець М.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Герасимов О.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Стовпець М.В. «Шарові композити для технологій радіаційного захисту»

Актуальність теми

У сучасному світі, де прогрес технологій і наукових відкриттів веде до постійного розвитку, актуальність проблеми захисту від радіаційного випромінювання набуває особливого значення. Зростання кількості ядерних експериментів, техногенних аварій та інших джерел випромінювання створює загрозу для здоров'я людини та навколишнього середовища. Наслідки таких ситуацій можуть мати далекосяжні наслідки, включаючи ракові захворювання, мутації генетичного матеріалу та інші серйозні проблеми. Таким чином, розробка та впровадження нових матеріалів для захисту від радіації стає важливим завданням науково-дослідницької галузі.

Мета та завдання дослідження

Метою даного дослідження є теоретичне вивчення та систематизація знань про матеріали із композитною структурою для захисту від радіаційного випромінювання. Детальний аналіз властивостей різних класів композитів, їх взаємодія з різними видами випромінювання та можливості застосування в різних галузях захисту від радіації є ключовими завданнями. При цьому, робота передбачає визначення оптимальних параметрів композитів для максимально ефективного захисту та розгляд питань їх виготовлення.

Об'єкт та предмет дослідження

Об'єктом дослідження є матеріали із композитною структурою, спрямовані на захист від радіаційного випромінювання. Предметом дослідження є теоретичні аспекти взаємодії композитів з різними типами випромінювання, їхні властивості та можливості виготовлення для досягнення найвищої ефективності у захисті від радіації.

Наукова новизна роботи

Наукова новизна даної роботи полягає у комплексному підході до вивчення матеріалів із композитною структурою для захисту від радіаційного випромінювання. Аналіз сучасних досягнень у цій галузі та їх інтеграція в новий теоретичний фреймворк роблять цю роботу унікальною та важливою для подальших досліджень у галузі радіаційного захисту.

Практична значущість

Результати даного дослідження можуть бути використані для розробки нових технологій та матеріалів, які забезпечать ефективний захист від радіаційного випромінювання. Це важливо для різних галузей, таких як медицина, промисловість, космічна індустрія та інші, де проблема радіаційного захисту є важливою. Успішне вирішення цієї проблеми може покращити якість життя та безпеку людей та довкілля.

Робота містить:

Сторінок – 65

Літературних посилань – 35

Ключові слова: композити, шаруваті композити, випромінювання, радіаційно-захисні корпуси, матриця.

ЗМІСТ

1 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ РАДІАЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	9
1.1 Основні властивості радіаційного випромінювання.....	9
1.2 Вплив радіаційного випромінювання на матеріали.....	10
1.3 Іонізуюче та неіонізуюче випромінювання.....	11
2 ОГЛЯД КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	12
2.1 Основні поняття.....	12
2.2 Класифікація композиційних матеріалів за геометрією та параметрами наповнювача.....	16
3 ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ ІЗ КОМПОЗИТНОЮ СТРУКТУРОЮ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД РАДІАЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ	25
3.1 Основні класи композитних матеріалів.....	25
3.2 Властивості композитів для захисту від радіаційного випромінювання.....	26
3.3 Методи теоретичних розрахунків ефективності захисту.....	27
4 ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ У ШАРУВАТИХ КОМПОЗИТАХ	35
4.1 Матеріали для захисту від іонізуючих випромінювань медичної діагностичної апаратури.....	44
4.2 Методика експерименту.....	47
ВИСНОВКИ.....	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	62

ВСТУП

На сьогоднішній день у багатьох сферах життєдіяльності людини використовуються різні енергетичні установки, в тому числі і ті установки, під час роботи яких можливе випромінювання іонізуючого випромінювання різної природи. Іонізуюче випромінювання - це випромінювання, енергія якого достатня для іонізації опроміненого середовища (наприклад мір, тканин тіла людини).

Людина може зіткнутися з такими різновидами іонізуючого випромінювання: електромагнітне (рентгенівське та гамма-випромінювання) та корпускулярне (альфа-випромінювання, бета-випромінювання, нейтронне та протонне випромінювання, позитронне випромінювання та ін.), а також опроміненням від радіоактивних газів, таких як радон, торон, актинон (утворюються в гірських породах і мінералах при альфа-розпаді природних радіоізотопів радію). Іонізуюче випромінювання, на відміну від інших видів випромінювань, наприклад, таких як ультрафіолетового, світлового, інфрачервоного, мікрохвильового здатне викликати різні фізико-хімічні зміни в клітинах організму, аж до незворотних.

Різні енергетичні установки вже широко застосовуються не тільки на ядерно-енергетичних об'єктах, але й у багатьох виробничих процесів, медицини.

Використання такої великої кількості радіаційних приладів та установок у життєдіяльності, звичайно висуває на перший план проблему забезпечення високого ступеня біолологічного захисту, організації безпечної роботи та робочого та обслуговуючого персоналу з таким обладнанням, а також контакту з таким обладнанням осіб із населення при суворому виконанні вимог забезпечення сучасних норм радіаційної безпеки.

Метою бакалаврської роботи є огляд результатів досліджень та останніх розробок у галузі створення сучасних композиційних радіаційно-захисних матеріалів будівельного призначення, здатних забезпечити необхідний рівень біологічного захисту при експлуатації різних обладнань.

1 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ РАДІАЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

1.1 Основні властивості радіаційного випромінювання

Теоретичні аспекти радіаційного випромінювання включають розгляд основних його властивостей, які визначають його вплив на навколишнє середовище та матеріали.

Основні властивості радіаційного випромінювання визначаються його природою та походженням. Радіаційне випромінювання може бути електромагнітним або частинковим. Електромагнітне випромінювання складається з фотонів, які переносять енергію через простір у хвилястій формі. Частинкове випромінювання включає частинки, такі як альфа- та бета-частинки, які можуть взаємодіяти з матеріалами, що перебувають на їхньому шляху [1].

Однією з важливих характеристик радіаційного випромінювання є його самовласність передавати енергію. Це визначається його інтенсивністю, яка вказує на кількість енергії, що переноситься через певну площу простору за одиницю часу. Іншою важливою властивістю є частота або довжина хвилі електромагнітного випромінювання, яка визначає його рівень енергії та взаємодію з речовиною [2].

Радіаційне випромінювання може також мати іонізуючий чи неіонізуючий характер. Іонізуюче випромінювання має достатню енергію для видалення електронів з атомів, утворюючи іони. Це може впливати на структуру та властивості матеріалів. З іншого боку, неіонізуюче випромінювання, таке як ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання, не має цієї здатності [3].

Вивчення цих властивостей є необхідним для розуміння взаємодії радіаційного випромінювання з матеріалами, що буде розглянуто у подальших розділах дослідження.

1.2 Вплив радіаційного випромінювання на матеріали

Вплив радіаційного випромінювання на матеріали визначається його енергією, іонізуючою здатністю та типом випромінювання. Цей вплив може призводити до фізичних та хімічних змін у структурі матеріалів, що важливо враховувати при розробці матеріалів для захисту від радіаційного випромінювання.

Енергія випромінювання є ключовим фактором, оскільки вона визначає здатність випромінювання проникати в матеріали та взаємодіяти з їхніми структурними компонентами. Високоенергетичне випромінювання, таке як гамма-промені, може призводити до іонізації атомів та руйнування хімічних зв'язків у матеріалах, змінюючи їх структуру та механічні властивості [4].

Важливо враховувати тип випромінювання при вивченні впливу на матеріали. Наприклад, альфа-частинки можуть бути локально іонізуючими через свою велику масу та заряд, тоді як бета-частинки мають менше іонізуючий потенціал. Також слід враховувати різницю між іонізуючим та неіонізуючим випромінюванням, оскільки ефекти можуть бути різними в залежності від типу випромінювання [5].

Зміни, що виникають в матеріалах під впливом радіаційного випромінювання, можуть бути тимчасовими чи постійними. Тимчасові зміни, такі як структурні дефекти, можуть виникати та зникають під впливом випромінювання. У той час як постійні зміни можуть включати фіксацію дефектів та необоротні зміни у хімічному складі.

Важливо зазначити, що вплив радіаційного випромінювання на матеріали може викликати знос та втому матеріалів, що може впливати на їхню довговічність та міцність. Це особливо актуально при розробці матеріалів для захисту від радіаційного випромінювання в умовах, де експозиція може бути тривалим процесом.

Іонізуюче та неіонізуюче випромінювання представляють собою дві основні категорії радіаційного випромінювання, кожна з яких має відмінні ефекти на матеріали та живі організми.

1.3 Іонізуюче та неіонізуюче випромінювання

Іонізуюче випромінювання має достатню енергію для видалення електронів з атомів, утворюючи іони. Це випромінювання включає в себе гаммапромені, рентгенівське випромінювання, альфа- та бета-частинки. Енергія цих частинок дозволяє їм проникати в матеріали та взаємодіяти з атомами, викликаючи іонізацію або створюючи вакансії в електронному оболонці атомів.

З іншого боку, неіонізуюче випромінювання не має достатньої енергії для видалення електронів з атомів. До неіонізуючого випромінювання відносяться ультрафіолетове випромінювання, інфрачервоне випромінювання та радіохвилі. Це випромінювання може взаємодіяти з матеріалами, але зазвичай його вплив менше іонізуючого [2].

Взаємодія іонізуючого випромінювання з матеріалами може призводити до утворення радіаційно-індукованих дефектів та змін хімічного складу. Гаммапромені та рентгенівське випромінювання проникають глибоко в матеріали, тоді як альфа- та бета-частинки мають більш обмежений проникність. Це може призводити до виникнення радіаційно-індукованих пузирів та дефектів у кристалічній структурі [5].

Неіонізуюче випромінювання, як правило, менше впливає на структуру матеріалів. Наприклад, ультрафіолетове випромінювання може викликати зміни в молекулярних зв'язках, але ці ефекти зазвичай менш виражені порівняно з іонізуючим випромінюванням [1-5].

Вивчення взаємодії іонізуючого та неіонізуючого випромінювання з матеріалами є ключовим для розробки матеріалів, які можуть захищати від радіаційного випромінювання або використовуватися у радіаційних умовах.

2 ОГЛЯД КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Основні поняття

Композиційними матеріалами (КМ) називають штучні багатокomпонентні матеріали, що складаються з матриці та наповнювача. При цьому між складовими компонентами композиту є чітка межа розділу фаз.

Міцні, експлуатаційні та інші властивості композиційного матеріалу залежать від співвідношення трьох основних параметрів:

- міцності армуючих компонентів;
- властивостей та жорсткості матриці;
- міжфазової взаємодії на кордоні між сполучним та наповнювачем.

Основними ознаками композитів прийнято вважати такі:

- композиційний матеріал має бути створений людиною;
- композиційний матеріал (або композиція) утворюється за рахунок об'ємного поєднання складових його компонентів.
- композит повинен володіти властивостями, якими не володіє жоден із складових- його матеріалів;
- різнорідні компоненти композиту не повинні хімічно взаємодіяти між собою;
- композиційний матеріал повинен складатися не менше ніж з двох різнорідних компонентів з чіткою межею поділу між ними.

За структурою та розташуванням компонентів композиційні матеріали можуть бути каркасними, матричними, шаруватими та мати комбіновану структуру. Композиційні матеріали також підрозділяють по геометрії (формі) армуючого компонента, схемою його розташування в матриці та механізму зміцнення. Умови, необхідні для створення композиційних матеріалів [6].

При виборі матеріалів для виготовлення композиту необхідно, щоб між компонентами була фізико-хімічна сумісність, яка зводиться до наступного:

- при виготовленні та в умовах експлуатації компоненти, що входять до складу композиту, не повинні утворювати хімічних сполук або твердих розчинів, котрі можуть знизити міцність армуючих елементів;

- для обраних компонентів слід забезпечити міцний зв'язок між матрицею та наповнювачем;

- відмінність між коефіцієнтами термічного розширення компонентів не повинна викликати руйнування чи розтріскування якогось із них у складі композиту;

- відсутність залишкових деформацій при асиметричному циклі навантаження, що сприяють зниженню міцності композиту;

- отриманий композиційний матеріал повинен мати найкращі показники за питомою міцністю та жорсткістю, ніж монолітні матеріали, що використовуються для створення самого композиту в даних умовах; – новостворений композит має бути економічно ефективнішим, ніж існуючі матеріали. Композиційні матеріали розрізняють:

- за матеріалом матриці;

- армуючим компонентам;

- геометрії компонентів, їх структуру та їх розташування в композиті; – методам виготовлення [7-10].

Найбільш широко застосовується класифікація композитів за матеріалом матриці. На Рис. 2.1 наведено класифікацію композитів за видом застосовуваного матеріалу матриці. Відповідно до цього композиційні матеріали поділяються на металеві та неметалеві. До металевих відносяться композити на металевій матриці, до неметалевих - цементні, керамічні, полімерні, вуглецеві матеріали.

Композити з матрицею змішаного типу зводяться до поліматричних композиційних матеріалів (рис. 2.2, а). Композиційні матеріали, що складаються з трьох і більше компонентів та містять у своєму складі наповнювачі різної природи називаються гібридними (поліармованими) композитами (рис. 2.2, б).

У композиційних матеріалах істотна роль відводиться матриці, яка виконує такі функції: – забезпечує монолітність композиту; – виконує зміцнювальну функцію; – фіксує взаємне розташування армуючих компонентів (волокон, дисперсних) частинок) та форму виробу; – виконує функцію рівномірного розподілу діючих напруг по всьому обсягу матеріалу на наповнювач, а також їх перерозподіл при руйнуванні частини волокон. В якості матриці та наповнювача застосовуються найрізноманітніші за природою та походженням матеріали [9].

Існують композити на основі металів, кераміки, скла, цементного каменю, вуглецю, полімерів та інших матеріалів. Матриця (сполучна) є пластичною, а наповнювач (армуючі компоненти) має високу міцність і жорсткість.



Рис. 2.1. Класифікація композиційних матеріалів за матеріалом матриці

Методи одержання композиційних матеріалів. Основні вимоги до будь-якого методу виготовлення композитів полягають у максимальному збереженні вихідної міцності армуючих компонентів, забезпеченні необхідної орієнтації в матриці та створенні умов для міцного з'єднання вихідних компонентів [10].

Для композитів на металевій матриці існує три основні методи синтезу компонентів, що залежать від вихідного агрегатного стану матриці: –

твердофазний (прокатка, дифузійне зварювання, гаряче динамічне пресування, зварювання вибухом та магнітно-імпульсним способом);

- рідкофазний;
- осадження;
- комбінований.

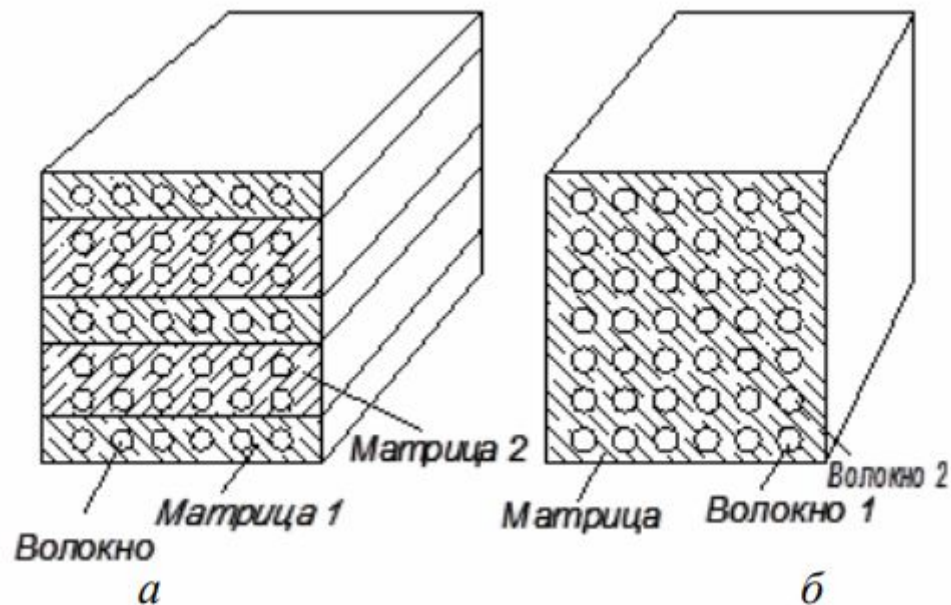


Рис. 2.2. Схеми армування композитів: а - поліматричний композит; б - гібридний (поліармований) композит

У процесі проведення твердофазного синтезу як матриця використовуються листові матеріали або матеріали в порошкоподібному стані. При цьому створення композиту здійснюється у прес-формах за допомогою спільного пресування порошкоподібного сполучного з рівномірно розподіленими в ньому дискретними волокнами (металевими, керамічними, ниткоподібними кристалами).

Недолік цього методу полягає в труднощі з наданням напрямку орієнтації армуючих волокон. Так, наприклад, для надання певної орієнтації армуючих компонентів у вигляді ниткоподібних кристалів їх попередньо покривають

металом (нікелізація), після чого суміш волокон з матрицею з алюмінієвого сплаву поміщають у магнітне поле, в якому волокна розташовуються за напрямом силових ліній.

Перевагою методу є високі показники міцності одержуваних виробів, мінімальні допуски за розмірами виробів, скорочення часу спікання, оскільки процеси пресування та спікання поєднуються. Недоліком методу є швидке зношування прес-форм та невисока продуктивність процесу. Рідкофазні методи виготовлення композитів є високопродуктивними, застосовуються під час виготовлення виробів складної форми з можливістю використання джгутових та тканинних армуючих матеріалів, дозволяють повністю автоматизувати технологічний процес виробництва.

Методи передбачають отримання металевих композитів шляхом поєднання армуючих волокон із розплавленою матрицею. До них відносять методи просочення волокон рідкими матричними сплавами та метод спрямованої кристалізації.

Недоліками цих методів є висока температура одержання, наявність міжфазних взаємодій та ретельний вибір компонентів. Метод осадження дозволяє отримувати багатошарові композиції, що мають високу міцністю.

При виробництві металевих композитів методом осадження напилення матричний метал наносять на волокна з розчинів солей або інших хімічних сполук за допомогою плазмового або вакуумного напилення. Комбінований метод отримання композитів є поєднанням двох та більше зазначених методів [6-11].

2.2 Класифікація композиційних матеріалів за геометрією та параметрами наповнювача

Залежно від геометрії армуючих елементів наповнювача та їх взаємного розташування властивості композитів можуть бути однаковими у всіх напрямках - ізотропними (дисперсно-зміцнені КМ) та різними -

анізотропними (КМ, зміцнені безперервними волокнами, орієнтованими у певних напрямках).

Ізотропні композити мають однакові властивості у всіх напрямках. До них відносяться композити з порошкоподібними наповнювачами. До ізотропних умовно можна віднести композити з дискретними частинками. Властивості матеріалів з анізотропними властивостями залежать від напрямку розташування армуючого компонента, які можуть бути односпрямованими, шаруватими та тривимірно-спрямованими.

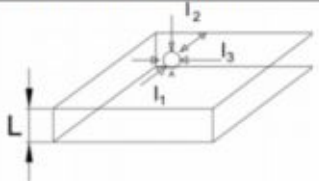
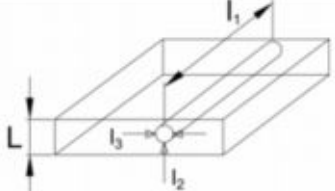
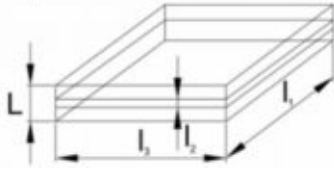
Характер розташування складових елементів, як і напрямках діючих навантажень, і стосовно друг до друга, тобто. їх упорядкованість, дуже впливає на властивості композиту. Композити, що мають високу міцність, мають, як правило, високоупорядковану структуру [12].

Композити в залежності від геометричних розмірів наповнювача поділяють (Табл. 2.1):

- на нульмерні або дисперсно-зміцнені;
- зміцнені частинками з вельми порівнянно малими розмірами у трьох вимірах;
- одномірні — армовані волокнами, з малими розмірами у двох напрямках і значно вищим розміром у третьому вимірі;
- двовимірні — армовані наповнювачем у вигляді шарів, листів, пластин або тканин з двома розмірами, порівнянними з розміром композиційного матеріалу і значно перевищують третій розмір.

Застосування наповнювачів різної форми та природи сприяє покращенню фізичних, технологічних та експлуатаційних властивостей композитів. Наприклад, для збільшення міцності зв'язку між волокнами на основі вуглецю або скла полімерне сполучне вводяться частинки карбїду кремнію. Для підвищення модуля пружності композиційних матеріалів з полімерною матрицею спільно вводяться волокна на основі скла та бору.

Таблиця 2.1 - Класифікація наповнювача формою

Компонент	Геометрия компонента	Соотношение размеров
Нульмерный		$\frac{l_1}{L} \ll 1; \frac{l_2}{L} \ll 1; \frac{l_3}{L} \ll 1;$
Одномерный		$\frac{l_1}{L} \sim 1; \frac{l_2}{L} \ll 1; \frac{l_3}{L} \ll 1;$
Двумерный		$\frac{l_1}{L} \sim 1; \frac{l_2}{L} \ll 1; \frac{l_3}{L} \sim 1;$

Наповнювачі композитів можуть виконувати різні функції. Залежно від призначення наповнювачі поділяють на армуючі (підсилюючі механічні властивості) та технологічні (змінюючі фрикційні, електричні, теплофізичні та інші властивості) [13-17].

Варіюючи об'ємний вміст складових компонентів можна отримувати композиційні матеріали із заданими властивостями: високою міцністю, жаростійкістю, високим модулем пружності, абразивною стійкістю, а також необхідними магнітними, діелектричними, радіопоглинаючими показниками. Залежно від схеми армування чи розташування армуючих компонентів у матриці (рис. 2.3) розрізняють такі види композитів:

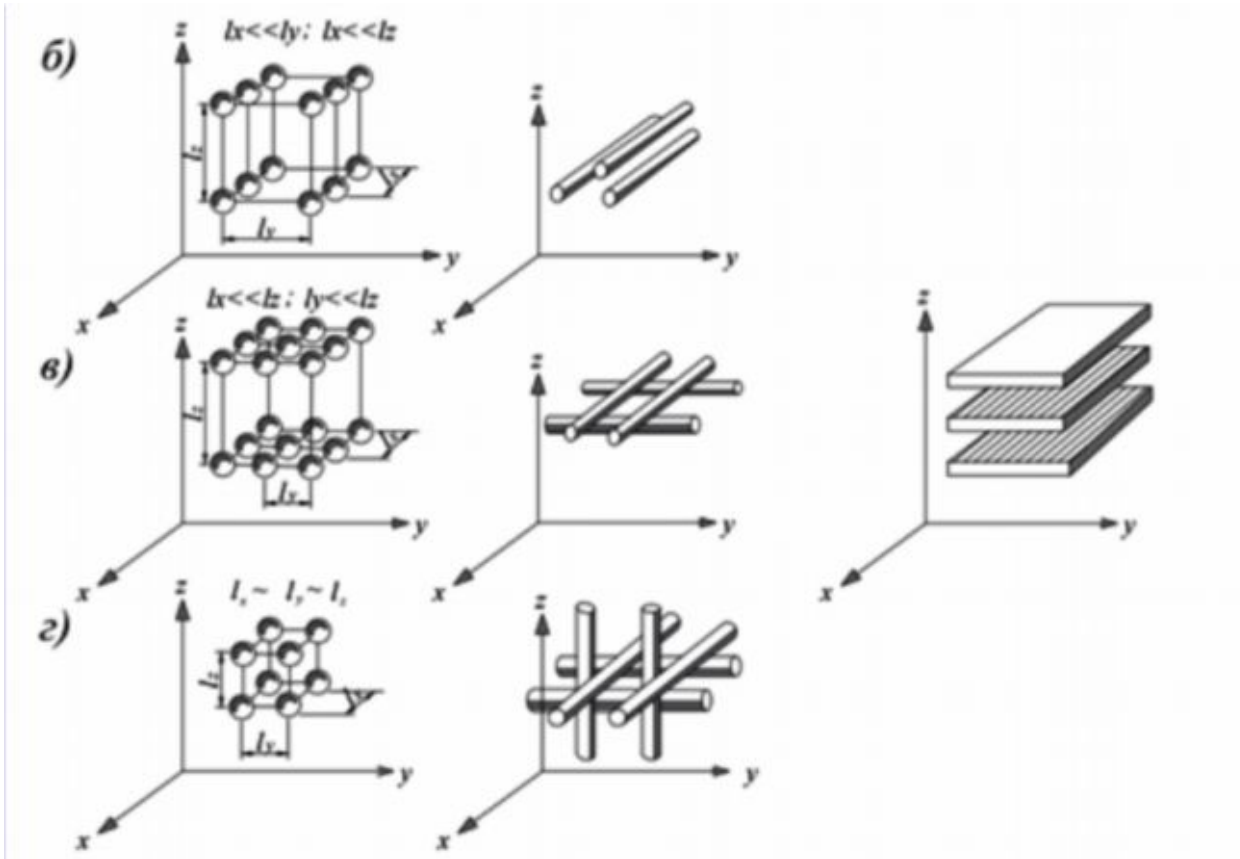


Рис. 2.3. Класифікація композитів за схемою армування: а - одновісне армування; б - двовісне армування; в - тривісне армування

Композити з одновісним (лінійним) розташуванням армуючих компонентів у матриці (рис. 2.3, а), що являють собою нульмерні та одновимірні наповнювачі у вигляді частинок, волокон, ниток, орієнтованих ланцюжків ниткоподібних кристалів. При цьому відстань між нульмерними наповнювачами вздовж одного напрямку значно менша, ніж по двох інших, тобто $l_x \ll l_y; l_x \ll l_z$. Зміст нульмерних наповнювачів у композитах за обсягом становить 1-5%. При одновісному армуванні одновимірні наповнювачі розташовуються паралельно одне одному. Композити з двовісним (площинним) розташуванням армуючих компонентів (рис. 2.3, б) у вигляді нульмерних, одновимірних та двовимірних наповнювачів, що представляють собою частинки, волокна, фольгу, мати. При цьому, у разі

армування нульмерними та одновимірними наповнювачами, вони розташовуються паралельно один одному зі значно меншою відстанню між собою в межах площини, ніж між самими площинами, тобто $l_x \ll l_z; l_y \ll l_z$. Зміст нульмерних армуючих компонентів за обсягом може досягати 15-16%. Одномірні наповнювачі розташовуються паралельно в межах даної площини, але по відношенню до інших площин зазвичай під різними кутами. Двовимірні наповнювачі розташовані паралельно один до одного. Композити з тривісним (об'ємним) армуванням (рис. 2.3, в), які характеризуються відсутністю будь-якого напрямку у розподілі наповнювача. Для армування використовують нульмерні та одновимірні наповнювачі. Розташовуються нульмерні наповнювачі на однаковій відстані від одного у всіх трьох вимірах у межах одного порядку, тобто $l_x \sim l_y \sim l_z$. При цьому їх вміст у матриці за обсягом може перевищувати 15%. Одномірні наповнювачі розташовуються в трьох і більше площинах, що перетинаються. На рис. 2.4 представлені можливі схеми армування композитів

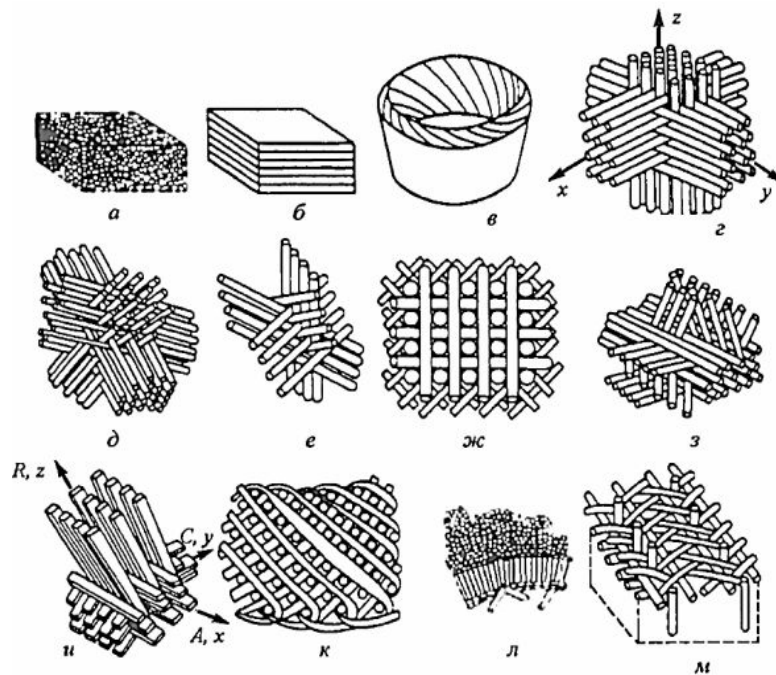


Рис. 2.4. Схеми армування композитів: а - хаотична; б - шарувата; в - розеточна; г-з - ортогональне армування; і - аксіально-радіальноокружна; до - аксіально-спіральна; л - радіально-спіральна; м — аксіально-радіально-спіральний

Залежно від характеру взаємодії з матеріалом матриці наповнювачі поділяють на інертні та активні (зміцнюючі). Механізм взаємодії матриці з наповнювачем визначається хімічною природою цих матеріалів та станом поверхні наповнювача [18].

Найбільший ефект посилення досягається при виникненні між наповнювачем та матеріалом матриці хімічних зв'язків або значної адгезійної взаємодії. Наповнювачі, здатні до такої взаємодії з матрицею, називаються активними. Інертними є наповнювачі, які не здатні до цієї взаємодії. Останні застосовують для полегшення переробки чи зниження вартості виробів.

На вигляд армуючого компонента композиційні матеріали поділяються:

- волокнисті - армовані дискретними або безперервними волокнами, ниткоподібними кристалами;
- армовані дисперсними частинками з невизначеною, кубічною, кулястою або лускатою формою;
- шаруваті, створені шляхом пресування або прокатки різнорідних матеріалів, армовані безперервними та дискретними пластинами;
- нанокompозити, отримані шляхом введення до складу наночастинок розміром 1–100 нм.

Волокнисті композити є матеріал, армований волокнами. Основою волокнистих наповнювачів є дискретні (короткі) або безперервні елементарні волокна, які можуть використовуватись самостійно або для виробництва інших форм волокнистих матеріалів: ниток, ровінгів, стрічок, тканин, полотен тощо.

При створенні волокнистих композитів застосовуються високоміцні скляні, вуглецеві, борні та органічні волокна, волокна рослинного походження (льоноволокно, тирсу), металеві дроти, а також волокна і ниткоподібні кристали ряду карбідів, оксидів, нітридів та інших сполук. різноманітні волокнисті матеріали. Введення волокон до складу композиту, навіть у невеликих кількостях, призводить до суттєвого покращення

механічних характеристик матеріалу. Значний вплив на властивості композитів надає орієнтація волокон, їх розмір та концентрація в обсязі матеріалу. Межа міцності волокнистих композиційних матеріалів прямо пропорційна межі міцності волокон та їх об'ємного змісту.

Міцність композицій з переривчастими волокнами визначається механічними властивостями та довжиною волокон, міцністю зв'язки між компонентами, а також здатністю матриці чинити опір зрушуючим напруг.

Основне призначення матриці у волокнистих композиційних матеріалах в наступному:

- об'єднанні волокон у єдине ціле;
- рівномірному роз'єднанні їх між собою;
- захист волокон від впливу зовнішнього середовища;
- перерозподіл напруг між волокнами.

Волокнисті композиційні матеріали виготовляють двома способами:

1) зміцнююча фаза у вигляді найтонших волокон утворюється безпосередньо при спрямованій кристалізації евтектичних сплавів у разі застосування металевої матриці;

2) волокна, що зміцнюють, спочатку готуються окремо, а потім вводяться в матрицю.

Композити із дисперсними наповнювачами. У більшості випадків дисперсні або порошкові наповнювачі розглядаються як дешеві добавки чи заповнювачі обсягу.

Дисперсні наповнювачі відрізняються формою частинок: сферичні, пластинчасті, лускаті, голчасті та ін. Наповнювачі можуть бути органічного (порошки деревного борошна, крохмалю) та неорганічного (тальк, крейда, каолін, скло) походження.

Для отримання полімерних КМ зазвичай застосовують тверді наповнювачі:

- тонкодисперсні з частинками зернистої форми (сажа, діоксид кремнію, деревна) борошно, крохмаль, крейда, каолін та ін);

- пластинчастої форми (тальк, слюда, графіт та ін.);
- порожнисті сфери зі скла кулястої форми з функцією зменшення ваги композитів.

У композиційних матеріалах на полімерній матриці дисперсні наповнювачі (сажа, графіт, порошки металів, рубані волокна, порошки металів та ферити) для надання матеріалу спеціальних електрофізичних властивостей [19].

Ще однією групою дисперсних наповнювачів, які все частіше використовуються в даний час, є полімери у формі дисперсних частинок. Композиційні матеріали із застосуванням дисперсних наповнювачів на металевій матриці зводяться до дисперсно-зміцнених.

В цій якості застосовуються дисперсні частинки тугоплавких фаз: оксиди, бариди, нітриди, карбіди, такі як Al_2O_3 , SiO_2 , BN, SiC. Дисперсно-зміцнені композити на металевих матрицях відносяться до класу порошкових композитів, містять частинки розміром 0,01-0,1 мкм з відстанню між ними 0,05-0,5 мкм. Об'ємний вміст наповнювача може досягати 1-15% і залежить від схеми армування.

Дисперсно-зміцнені композити являють собою матеріал, що складається з матриці, що сприймає основне навантаження і є основним несучим елементом, і дисперсного наповнювача, що зміцнює матеріал і чинить опір руху дислокацій при навантаженні, що перешкоджає розвитку пластичної деформації.

Міцність дисперсно-зміцнених композитів тим вища, чим більше опір зміцнювальних частинок, і залежить від дислокаційної структури, що формується у процесі пластичної деформації під час виготовлення виробів. Міцність дисперсно-зміцнених композиційних матеріалів залежить від об'ємного змісту наповнювача, рівномірності його розподілу, дисперсності наповнювача та відстані між його частинками. Опір зсуву зростає із зменшенням відстані між частинками:

$$\sigma = Gb/l, \quad (2.1)$$

де G - модуль зсуву; b - міжатомна відстань; l - Відстань між частинками.

Дисперсно-зміцненим композитам притаманні властивості ізотропії. Цим вони відрізняються від волокнистих композитів. У металургії дисперсно-зміцнені композити отримують механічним та хімічним змішуванням порошків, поверхневим або внутрішнім окисленням, механічним легуванням.

Шаруваті композиційні матеріали є поєднанням матриці і наповнювача, розташованого шарами. Прикладами таких матеріалів є триплекс, фанера, клеєні дерев'яні конструкції та шаруваті пластики.

Наноккомпозити є новим класом композиційних матеріалів, у складі яких є частинки нанометрового діапазону. Розміри частинок, що входять до складу, знаходяться в діапазоні від 1-100 нм [14-20].

3 ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ ІЗ КОМПОЗИТНОЮ СТРУКТУРОЮ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД РАДІАЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

3.1 Основні класи композитних матеріалів

Основні класи композитних матеріалів включають у себе різноманітні комбінації матриці та армуючих матеріалів, що визначають їхні властивості та застосування. Композити є важливою галуззю матеріалознавства та інженерії, в якій об'єднуються властивості різних матеріалів для досягнення оптимальних характеристик.

Матриця і армуючий матеріал є двома основними складовими композитів. Матриця визначає основною структурою матеріалу, а армуючий матеріал (арматура) надає йому механічну підтримку. Це спільне поєднання дозволяє створювати матеріали зі змішаними властивостями, які виходять за рамки можливостей кожного окремого компонента.

Одним із основних класів композитів є волокнисті композити, де арматура представлена волокнами, такими як скловолокно, карбонове волокно або арамідне волокно, вбудованими в матрицю, яка може бути полімером або матеріалом на основі металу. Ці композити мають високу міцність та міцність при низькій вазі, що робить їх ідеальними для виробництва легких та міцних конструкцій у літакобудуванні, автомобілебудуванні та інших галузях [16].

Інший вид - ламінати, де арматура складається зі шарів або листів, які об'єднуються за допомогою матриці. Ці матеріали дозволяють досягати властивостей, що змінюються в залежності від орієнтації шарів, що робить їх корисними для виробництва конструкцій із змінними механічними властивостями [17].

Самозміцнюючі композити використовують високоміцні матеріали для обидвох компонентів, матриці та арматури. Ці композити здатні витримувати значні навантаження та залишатися стійкими при високих

температурах, що робить їх підходящими для високотемпературних застосувань, таких як авіаційна інженерія [18].

Важливим класом композитів є композитні матеріали для захисту від радіаційного випромінювання. Ці матеріали використовуються для створення ефективних бар'єрів, які зменшують або поглиблюють вплив радіаційного випромінювання на оточуючі матеріали та системи [19].

3.2 Властивості композитів для захисту від радіаційного випромінювання

Властивості композитів для захисту від радіаційного випромінювання мають визначальне значення при розробці ефективних інженерних рішень для мінімізації впливу радіації на матеріали та системи. Композити в цьому контексті часто вибираються через їхню здатність до ефективного поглиблення чи відбивання радіації.

Поглиблення радіації є ключовою властивістю, яка забезпечує захист від іонізуючого випромінювання. Композити розробляються так, щоб їхні складові матеріали взаємодіяли з випромінюванням, поглиблюючи його та зменшуючи його проникність. Використання арматурних матеріалів з високою атомною масою та здатністю до іонізації є одним з методів досягнення високої ефективності поглиблення [20].

Додатково, електромагнітні властивості композитів мають велике значення. Деякі композити можуть виявляти здатність відбивати чи направляти радіацію, використовуючи принципи взаємодії з електромагнітним випромінюванням. Це особливо важливо у випадках, коли необхідно керувати напрямком та розподілом радіації [19].

Структурні властивості грають важливу роль у стійкості композитів під впливом радіаційного випромінювання. Оскільки радіація може викликати дефекти та зміни у структурі матеріалів, композити повинні бути розроблені так, щоб утримувати ці ефекти на мінімальному рівні. Крім того,

структурна стабільність важлива для забезпечення тривалої служби матеріалів у умовах високого рівня випромінювання [12].

Вивчення та розуміння характеристик поглиблення радіації композитами важливе для оптимізації їхньої ефективності. Дослідження механізмів поглиблення, впливу хімічного складу та структури на ці характеристики є необхідним для розробки оптимальних композитних матеріалів для захисту від радіації [13].

3.3 Методи теоретичних розрахунків ефективності захисту

Для оцінки ефективності захисту матеріалів із композитною структурою від радіаційного випромінювання використовуються різні теоретичні підходи та методи розрахунків. Розглянемо деякі з них та зазначимо формули та розрахунки, які використовуються для оцінки ефективності захисту.

1. Лінійне затемнення:

Лінійне затемнення є одним з фундаментальних концепцій в радіаційній фізиці і використовується для опису зменшення інтенсивності іонізуючого випромінювання при проходженні через різні матеріали. Цей параметр визначає, наскільки ефективно матеріал поглиблює радіацію, і відображається в рівнянні:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (3.1)$$

де:

- $I(x)$ - інтенсивність випромінювання на глибині x ,
- I_0 - початкова інтенсивність випромінювання,

- μ - коефіцієнт лінійного затемнення,
- x - глибина проникнення в матеріал.

Означення параметрів:

1. Коефіцієнт лінійного затемнення Матеріали із композитною структурою для захисту від радіаційного випромінювання μ :

- Цей параметр визначає, як швидко зменшується інтенсивність випромінювання при проникненні в матеріал. Він визначається як відношення зменшення інтенсивності до довжини проходження у матеріалі.

2. Початкова інтенсивність Матеріали із композитною структурою для захисту від радіаційного випромінювання I_0 :

- Це інтенсивність випромінювання на початковій точці входу в матеріал.

3. Глибина проникнення Матеріали із композитною структурою для захисту від радіаційного випромінювання x :

- Це відстань, яку пройшло випромінювання в матеріалі. При збільшенні глибини проникнення інтенсивність випромінювання зменшується.

Вплив коефіцієнта лінійного затемнення:

- Висока ядерна густина:

- Матеріали з високою ядерною густиною (такі як свинець) мають великі значення коефіцієнта лінійного затемнення, що робить їх ефективними для захисту від випромінювання.

- Енергія випромінювання:

- Коефіцієнт лінійного затемнення зазвичай залежить від енергії випромінювання. Для вищих енергій випромінювання може бути ефективним використання матеріалів з меншим коефіцієнтом лінійного затемнення.

- Особливості матеріалу:

- Різні матеріали можуть мати різний коефіцієнт лінійного затемнення в залежності від їхньої структури та хімічного складу.

Лінійне затемнення є ключовим параметром для розуміння проникнення іонізуючого випромінювання в матеріал та визначення ефективності захисту від радіації.

Масовий лінійний коефіцієнт поглиблення є важливим параметром, який визначає ефективність поглиблення іонізуючого випромінювання матеріалом і враховує його масову густину. Цей коефіцієнт, позначений як $\frac{\mu}{\rho}$ розглядається для матеріалів при проходженні через них різних типів випромінювання.

Масовий лінійний коефіцієнт поглиблення визначається як відношення коефіцієнта поглиблення (μ) до масової густини матеріалу (ρ). Масова густина вимірюється у кількості маси, яка припадає на один об'єм матеріалу. Формула для масового лінійного коефіцієнта поглиблення виглядає наступним чином:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu}{\rho_{\text{матеріалу}}} \quad (3.2)$$

де:

$\frac{\mu}{\rho}$ - масовий лінійний коефіцієнт поглиблення,

- μ - коефіцієнт поглиблення матеріалу,
- $\rho_{\text{матеріалу}}$ - масова густина матеріалу.

Цей коефіцієнт дозволяє порівнювати ефективність різних матеріалів у поглибленні випромінювання, враховуючи їхню масову густину. Чим вище значення масового лінійного коефіцієнта поглиблення, тим більше випромінювання поглиблюється при проходженні через матеріал, що робить його більш ефективним для захисту від радіаційного випромінювання.

У практичних застосуваннях, наприклад, у медичних дослідженнях або в проектуванні захисних матеріалів, важливо знати масовий лінійний коефіцієнт поглиблення для визначення ефективності матеріалу в області іонізуючого випромінювання.

Півтовщина є важливим параметром у вивченні взаємодії матеріалів з випромінюванням та визначенні їхньої ефективності у зменшенні

інтенсивності випромінювання. Цей термін використовується в медичній діагностиці, промислового контролю, а також у сфері захисту від радіаційного випромінювання.

Півтовщина визначає товщину матеріалу, яка зменшить інтенсивність випромінювання вдвічі (до 50% від початкового значення). Це важливий показник для визначення проникливості матеріалу для конкретного типу випромінювання. Півтовщина обчислюється за допомогою експоненційної функції, яка враховує затемнення матеріалу для випромінювання.

Півтовщина H обчислюється як та товщина матеріалу, при якій інтенсивність випромінювання зменшується вдвічі:

$$H = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (3.3)$$

Застосування:

1. Медична діагностика:

- Визначає проникливість матеріалів для рентгенівського випромінювання при використанні рентгенівських пристроїв.

2. Промисловий контроль:

- Використовується для визначення товщини матеріалів та виявлення дефектів за допомогою різних видів випромінювання.

3. Захист від радіації:

- Оцінює ефективність матеріалів у зменшенні дози випромінювання.

Півтовщина є важливим параметром для інженерів, фізиків та лікарів, що дозволяє визначити оптимальні матеріали для конкретних застосувань і підвищити безпеку та ефективність використання випромінювання.

4. Енергетичний транспорт

Метод енергетичного транспорту є одним із підходів до моделювання взаємодії випромінювання з матеріалами та оцінки ефективності їхнього захисту. Цей метод дозволяє враховувати розподіл енергії випромінювання

серед різних типів частинок, а також взаємодію їхніх енергетичних компонентів з матеріалом.

Основні принципи методу енергетичного транспорту:

1. Розподіл енергії:

- Метод розглядає енергію випромінювання як сукупність різних енергетичних компонентів, таких як фотони, електрони, альфа- та бета-частинки.

2. Взаємодія з матеріалом:

- Розглядається взаємодія різних типів частинок з матеріалом, включаючи процеси розсіювання, поглиблення та іонізації.

3. Ефективність захисту:

- Метод дозволяє визначити, як енергетичні компоненти випромінювання змінюють свою енергію при проходженні через матеріал і як це впливає на ефективність захисту.

Процес енергетичного транспорту:

1. Початковий стан:

- Визначаються початкові енергії та типи частинок, які випромінюються.

2. Транспорт:

- Енергетичні компоненти переміщуються через матеріал, взаємодіючи з атомами та молекулами.

3. Взаємодія:

- Розглядається взаємодія частинок з матеріалом, їхня втрата енергії та можливі напрямки руху.

4. Розсіювання та поглиблення:

- Визначається ймовірність розсіювання та поглиблення в залежності від типу частинки та енергії.

5. Фінальний стан:

- Визначається енергія та тип частинок після проходження матеріалу.

Математичні моделі:

Математичні рівняння та моделі враховують різні фізичні процеси, такі як взаємодія з електронами, поглиблення фотонів, або зупинка заряджених частинок в матеріалі. Залежно від потреби можуть використовуватися диференційні або інтегральні рівняння для опису енергетичного транспорту.

Застосування методу:

Метод енергетичного транспорту широко використовується для дослідження впливу матеріалів на розподіл енергії випромінювання та ефективність їхнього використання в захисті від радіаційного випромінювання

Розглянемо деякі основні формули, що використовуються в методі енергетичного транспорту для опису взаємодії випромінювання з матеріалами та їх ефективності захисту.

1. Розподіл енергії випромінювання

Зміна енергії E випромінювання в матеріалі може бути визначена через кількість взаємодій, поглиблення та розсіювання, що відбувається.

$$\Delta E = - \sum_i (E_i \cdot \Delta N_i) \quad (3.4)$$

де:

- E_i – енергія i – тої компоненти випромінювання,

- ΔN_i – кількість взаємодій i – тої компоненти.

2. Коефіцієнт поглиблення:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (3.5)$$

де:

- $I(x)$ - інтенсивність випромінювання на глибині x ,

- I_0 - початкова інтенсивність випромінювання,

- μ - коефіцієнт поглиблення.

3. Півтовщина:

Півтовщина H визначається як товщина матеріалу, при якій інтенсивність випромінювання зменшується вдвічі.

$$H = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (3.6)$$

4. Дифузійна довжина:

Дифузійна довжина λ визначає шлях, на який потрібно, щоб енергія фотону була зменшена в експоненційному спаді на $1/e$.

$$\lambda = \frac{1}{\mu} \quad (3.7)$$

Ці формули є загальними і можуть бути модифіковані залежно від конкретного контексту та типу випромінювання. Однак вони відображають основні принципи та показники, що використовуються в методі енергетичного транспорту для оцінки ефективності захисту від радіації.

Метод Монте-Карло в Моделюванні Взаємодії з Випромінюванням

Метод Монте-Карло (ММК) є потужним інструментом для чисельного моделювання процесів взаємодії випромінювання з матеріалами. Використовуючи стохастичні симуляції, цей метод дозволяє апроксимувати поведінку частинок випромінювання в матеріалі та оцінювати ефективність захисту. Давайте детальніше розглянемо цей процес.

Основні Кроки Методу Монте-Карло:

1. Ініціалізація:

- Задаються початкові параметри, такі як тип випромінювання, енергія частинок, та властивості матеріалу.

2. Генерація Траєкторій:

- Симулюється рух частинок випромінювання через матеріал. Для кожної частинки випромінювання визначається напрямок та енергія.

3. Взаємодія з Матеріалом:

- Симулюється взаємодія частинок з атомами матеріалу. Це включає випадковий вибір довжини кроку, взаємодію з атомами, розсіювання та поглиблення.

4. Запис Результатів:

- Результати симуляції, такі як ефективна доза або інші величини, записуються для подальших аналізів.

Математична Основа:

1. Функція Поглиблення (μ):

- Функція поглиблення визначає ймовірність поглиблення частинки на даному кроці. Використовується великою кількістю стохастичних випадкових чисел.

2. Довжина Кроку (Δx):

- Довжина кроку генерується випадковим чином враховуючи функцію поглиблення та властивості матеріалу.

3. Відбиття та Розсіювання:

- Враховуються ймовірності відбиття та розсіювання частинки від атомів матеріалу.

4 ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ У ШАРУВАТИХ КОМПОЗИТАХ

Класична робота Д. Релея показала, що плоскі хвилі, які поширюються в одновимірній періодичній безмежній структурі, на певних довжинах хвиль повністю відбиваються на внутрішніх границях власних фрагментів.

Це явище описується поняттям "заборонених зон" у сучасній термінології, що використовується в теорії твердого тіла і фотонній теорії кристалів. Це поняття (і в поєднанні з поняттям "забороненої зони") використовується для опису енергетичного спектра, провідності, коефіцієнта відбиття, пропускання, опору та деяких інших величин.

Відомо, що амплітуда хвиль всередині таких періодичних структур спадає експоненціально [20]. Наприклад, якщо симетрія початкового стану системи порушується внаслідок утворення дефектів, то можуть формуватися так звані дефектні моди, локалізовані в околі дефектів, і з'являтися хвилі, що експоненціально зростають і затухають. Загальний опис цього явища можна формально описати наступним чином. Типове електромагнітне явище описується системою рівнянь Максвелла виду

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \mathbf{D} &= \rho \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0 \end{aligned} \quad (4.1)$$

де $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}$ та $\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu \mu_0 \mathbf{H}$ – вектора електричного зміщення та магнітної індукції, відповідно, \mathbf{E} і \mathbf{H} – напруженості електричного та магнітного полів, \mathbf{P} і \mathbf{M} – поляризація та намагніченість речовини, \mathbf{j} і ρ – щільності струмів та вільних зарядів, ε і μ – діелектрична та магнітна проникності речовини, ε_0 і μ_0 – електрична та магнітна постійні.

Надалі для визначеності ми розглядатимемо немагнітні середовища з речовинною діелектричною проникністю ε та нульовою намагніченістю \mathbf{M} .

Враховуючи хвильовий характер електромагнітного поля та записуючи, як завжди, тимчасові залежності векторів \mathbf{E} і \mathbf{H} у вигляді гармонійних функцій

$$\begin{aligned}\mathbf{E} &= \vec{E} e^{-i\omega t} \\ \mathbf{H} &= \vec{H} e^{-i\omega t}\end{aligned}, \quad (3.89)$$

отримаємо відповідну (стаціонарну) форму рівнянь Максвелла, а саме:

$$\begin{aligned}\operatorname{rot} \vec{H} &= -i\omega\varepsilon \vec{E} \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -i\omega\mu \vec{H} \\ \operatorname{div} \vec{E} &= \rho \\ \operatorname{div} \vec{H} &= 0\end{aligned}. \quad (3.90)$$

Розглянемо шарувату структуру, де площина шару перпендикулярна до обраного напрямку. Ми обмежимося вивченням так званих ТЕ мод, що відповідають поляризації електромагнітної хвилі, яка поширюється в площині, паралельній до шару аналізованої системи, де виконується це співвідношення:

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \varepsilon \nabla \vec{E} e^{-i\omega t} = 0. \quad (4.2)$$

Стандартне перетворення (3.91) дає рівняння Гельмгольца, що описує електричне поле хвилі, яка поширюється в немагнітному діелектрику [21].

$$\Delta \vec{E} + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon' \vec{E} = 0, \quad (4.3)$$

$$\text{де } c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}; \varepsilon' = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}.$$

Слід зазначити, що така система по суті еквівалентна довгому ланцюжку гранул, які є частинками певного (ненульового) розміру, і

взаємодія яких з електромагнітним полем визначається діелектричною проникністю матеріалу гранул, а не його магнітними властивостями.

Ланцюжок гранул можна моделювати як наближену шарувату структуру, якщо гранули прилягають одна до одної без розривів і якщо розмір окремих частинок можна розглядати як шари в досить широкому діапазоні довжин хвиль. Тут, в першому наближенні, нехтуємо змінами електромагнітного поля в області контакту окремих гранул і пов'язаними з ними ефектами.

Наприклад, якщо попереднє ущільнення відбувається вздовж осі ланцюжка під дією сили тяжіння (у випадку вертикальних або похилих ланцюжків), то структура моделі буде складатися з шарів недеформованого і попередньо ущільненого матеріалу, що чергуються, з різними параметрами (зокрема, густиною і діелектричною проникністю). Схематично вищезгадані ланцюги показані на рисунку 4.1.

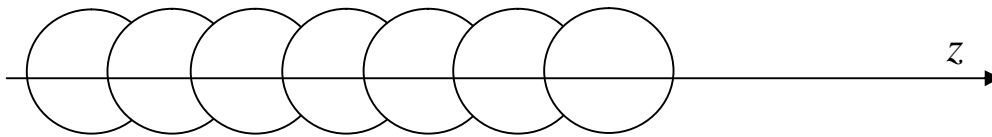


Рис.4.1 - Схематичне зображення гранульованого ланцюжка з прекомпресією

Такі моделі шаруватих періодичних структур (ШПС) широко використовуються в теорії твердого тіла та фотоніці [22]. Дотримуючись загального підходу, будемо вважати, що система є однорідною в будь-якій внутрішній точці системи, перпендикулярній до осі симетрії.

Згідно з цим припущенням, напруженість поля виражається в наступному вигляді.

$$\vec{E} = E_z \vec{n}_z e^{ikx}, \quad (4.4)$$

де $k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon \sin^2 \vartheta}$, \vec{n}_z – одиничний вектор осі симетрії, ϑ – кут падіння електромагнітної хвилі (надалі ми обмежимося розглядом випадку нормального падіння, для якого $\vartheta = \frac{\pi}{2}$), використовуючи рівняння Гельмгольца (4.3), отримаємо:

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} E_z + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_z E_z = 0 \quad (4.5)$$

Для вивчення нормального поширення електромагнітної хвилі в моделі ланцюжка гранул (надалі будемо також використовувати термін «гранульований ланцюжок») скористаємося стандартним методом матриці переносу (трансфер-матриці). Вважаючи, що діелектричні проникності, що відрізняються за величиною, в шарах з прекомпресією і без неї (відповідно, ε_2 і ε_1) задані, запишемо рішення рівняння Гельмгольца (4.5) для відповідних шарів:

$$\begin{aligned} E_1 &= A_1 e^{ik_1 z} + B_1 e^{-ik_1 z} & 0 < z < d_1 \\ E_2 &= A_2 e^{ik_2(z-d_1)} + B_2 e^{-ik_2(z-d_1)} & d_1 < z < d_1 + d_2, \\ E_3 &= A_3 e^{ik_1(z-d_1-d_2)} + B_3 e^{-ik_1(z-d_1-d_2)} & z > d_1 + d_2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

де $k_n = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_n}$ ($n=1,2$) – вектор хвиля в різних шарах, d_2 і d_1 – товщини шарів (розміри деформованої та недеформованої частин гранули).

На поверхнях, що розділяють шари, рішення та їх перші похідні мають бути безперервними. Виберемо циклічні граничні умови у такому вигляді:

$$\begin{aligned} E_1(d_1) &= E_2(d_1); & \frac{\partial E_1(d_1)}{\partial z} &= \frac{\partial E_2(d_1)}{\partial z} \\ E_2(d_1 + d_2) &= E_3(d_1 + d_2); & \frac{\partial E_2(d_1 + d_2)}{\partial z} &= \frac{\partial E_3(d_1 + d_2)}{\partial z} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Кожна з умов (4.7) може бути записана у вигляді матричного рівняння, що попарно зв'язує амплітудні коефіцієнти A_n, B_n и A_{n+1}, B_{n+1} ($n=1,2$)

$$\begin{pmatrix} A_{n+1} \\ B_{n+1} \end{pmatrix} = \bar{\mathbf{M}}_{n n+1} \begin{pmatrix} A_n \\ B_n \end{pmatrix}, \quad (4.8)$$

де $\bar{\mathbf{M}}_{n n+1} = \begin{pmatrix} \alpha_{n n+1}^* & \beta_{n n+1}^* \\ \beta_{n n+1} & \alpha_{n n+1} \end{pmatrix}$ – матриця перенесення (трансфер-матриця), складена з рішень (4.6) рівняння (4.7), що описує перехід між шарами n і $n+1$;

$$\alpha_{n n+1} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{k_n}{k_{n+1}} \right) e^{-ik_n d_n}, \quad \beta_{12} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{k_n}{k_{n+1}} \right) e^{ik_n d_n}.$$

Таким чином, повна матриця переносу, що відноситься до області взаємного перекриття гранул (інакше кажучи, до «елементарного осередку» гранульованого ланцюжка), виходить в результаті двох послідовних «перешивок» рішень (3.96) і має такий вигляд:

$$\bar{\mathbf{M}} = \bar{\mathbf{M}}_{23} \bar{\mathbf{M}}_{12} = \begin{pmatrix} \alpha^* & \beta^* \\ \beta & \alpha \end{pmatrix}, \quad (4.9)$$

де

$$\alpha = \left(1 - \frac{k_1}{k_2} \right) \left(1 - \frac{k_2}{k_1} \right) e^{i(k_2 d_2 - k_1 d_1)} + \left(1 + \frac{k_1}{k_2} \right) \left(1 + \frac{k_2}{k_1} \right) e^{-i(k_1 d_1 + k_2 d_2)}$$

$$\beta = \left(1 - \frac{k_1}{k_2} \right) \left(1 + \frac{k_2}{k_1} \right) e^{i(k_1 d_1 - k_2 d_2)} + \left(1 + \frac{k_1}{k_2} \right) \left(1 - \frac{k_2}{k_1} \right) e^{i(k_1 d_1 + k_2 d_2)}$$

Зазначимо, що матриця перенесення $\bar{\mathbf{M}}$ задає однозначне відображення амплітуд плоских хвиль типу (3.96) між сусідніми шарами, що повторюються. При цьому передбачається, що деформація середовища є однорідною і перехід від недеформованої області кожної гранули до

деформованої є точковим (так, зокрема, діелектрична проникність на межі розділу шарів змінюється стрибком) [23].

Для випадку N -часткового однорідного гранульованого ланцюжка повна матриця переносу $\bar{\mathbf{M}}_N$ факторизується. При цьому оптичні та геометричні параметри окремих гранул (діелектрична проникність та розміри) не змінюються протягом усього ланцюжка:

$$\bar{\mathbf{M}}_N = \bar{\mathbf{M}}^N. \quad (4.10)$$

Якщо однорідність системи порушується з різних причин (переважно через утворення дефектів), то факторизація зберігається, але параметри окремих факторів у відповідній залежності типу (4.10) вже не є однаковими:

$$\bar{\mathbf{M}}_N = \prod_{j=1}^N \bar{\mathbf{M}}(j) \quad (4.11)$$

Особливості руху частинок і поширення хвиль в одновимірних системах часто пов'язують зі спектральними параметрами таких систем. У цьому випадку під спектром розуміють:

- а) енергетичні спектри (дисперсійні співвідношення, що пов'язують енергію з імпульсом, хвильовим числом, частотою або довжиною хвилі)
- б) спектри відбиття, поглинання і пропускання (залежність відповідних коефіцієнтів від параметрів системи);
- в) спектр власних коливань (сукупність власних коливань);
- г) часово-частотні спектри (дискретна або неперервна залежність від частоти або часу різних властивостей сигналу, в тому числі імпульсів випромінювання).

Для опису всіх цих типів спектрів можна використовувати метод матриць переносу. Слід також зазначити, що існують загальні співвідношення, які пов'язують параметри різних спектрів, зокрема енергетичних спектрів, спектрів відбиття і пропускання.

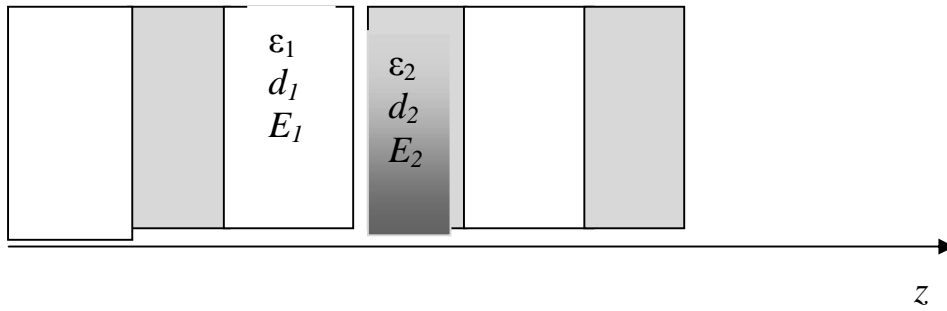


Рис.4.2 - Схематичне зображення квазіодномірної шарувато-періодичної структури, складеної з плоскопаралельних шарів, що чергуються, двох типів з різними оптичними і геометричними параметрами

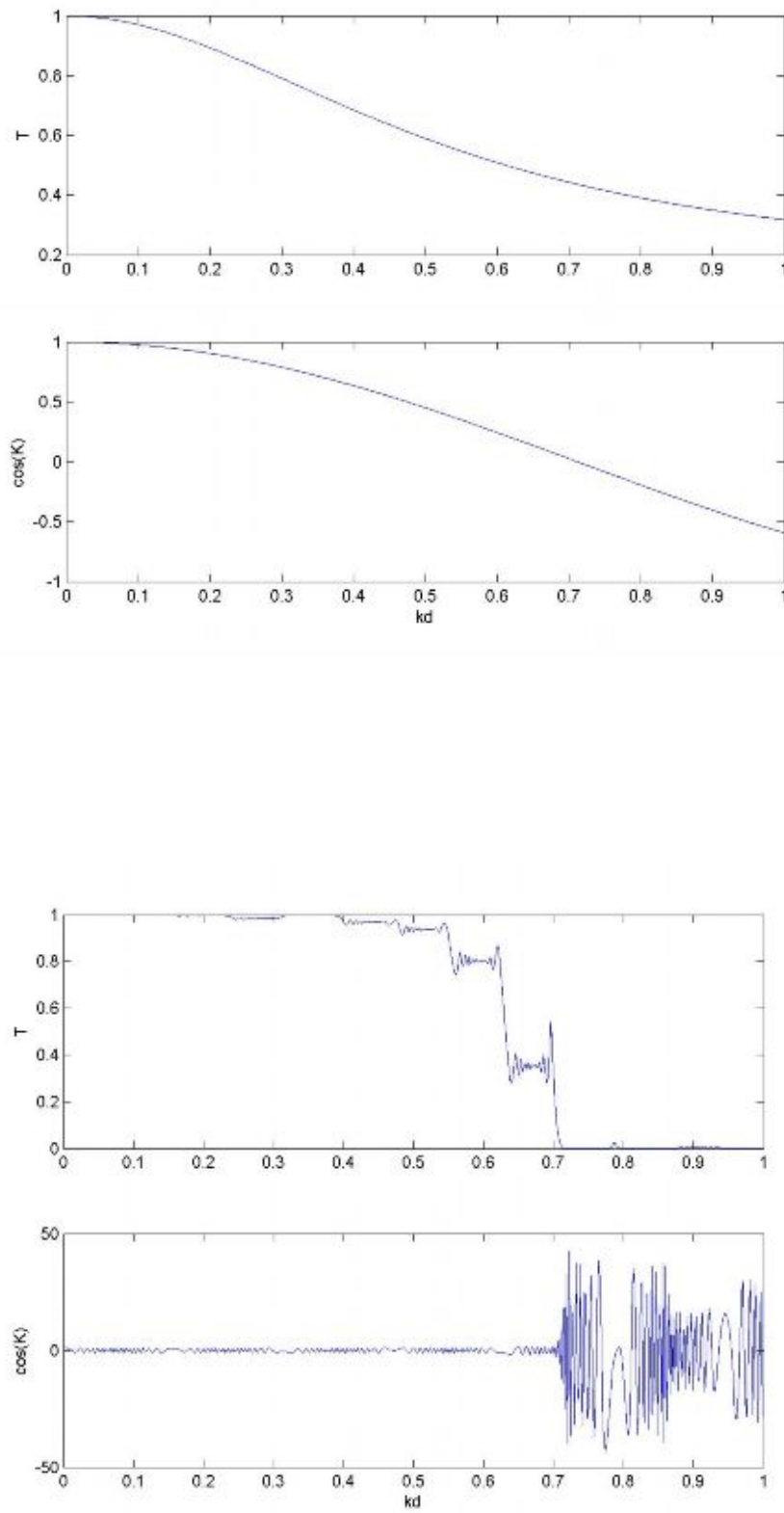
Припустимо, що для кожного шару товщини d оптична довжина пробігу $\sqrt{\varepsilon}d$ відрізняється від довжини хвилі λ на деяку задану величину. Користуючись (4.10), а також умовою нормування для повної матриці перенесення $\bar{\mathbf{M}}_N$:

$$\bar{\mathbf{M}}_N \begin{pmatrix} 1 \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (4.12)$$

де r та t – амплітудні коефіцієнти відображення та проходження, визначимо коефіцієнт проходження T , характеризує перенесення енергії електромагнітної хвилі через відокремлений шар (гранулу) у структурі ланцюжка в рамках моделі УПС як функцію частоти ω або $kd \equiv k_2(d_1 + d_2)$:

$$T = |t|^2 = \frac{1}{|\alpha|^2} = \left[\left(\frac{k_1}{k_2} \right)^2 + \left(\frac{k_2}{k_1} \right)^2 - \left(\frac{k_1}{k_2} - \frac{k_2}{k_1} \right)^2 \cos 2k_2 d_2 \right]^{-1} \quad (4.13)$$

Графік для коефіцієнта проходження T , побудований за допомогою (4.12) для різних значень параметрів представлений на Рис. 4.3. Области значень, у яких коефіцієнт проходження відмінний від нуля, відповідають дозволеним значенням частоти (хвильового вектора).



Продовження рис. 4.3

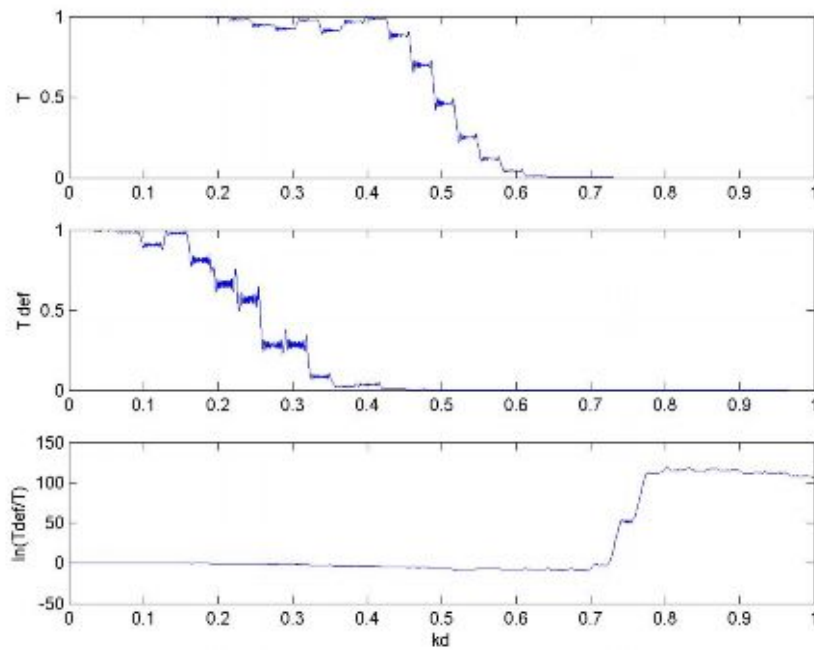


Рис.4.4 - Залежність коефіцієнта проходження T та спектру $\cos K$ від наведеного хвильового вектора kd ($\varepsilon_2/\varepsilon_1 = 1.2$; $\varepsilon_{def}/\varepsilon_1 = 2$)

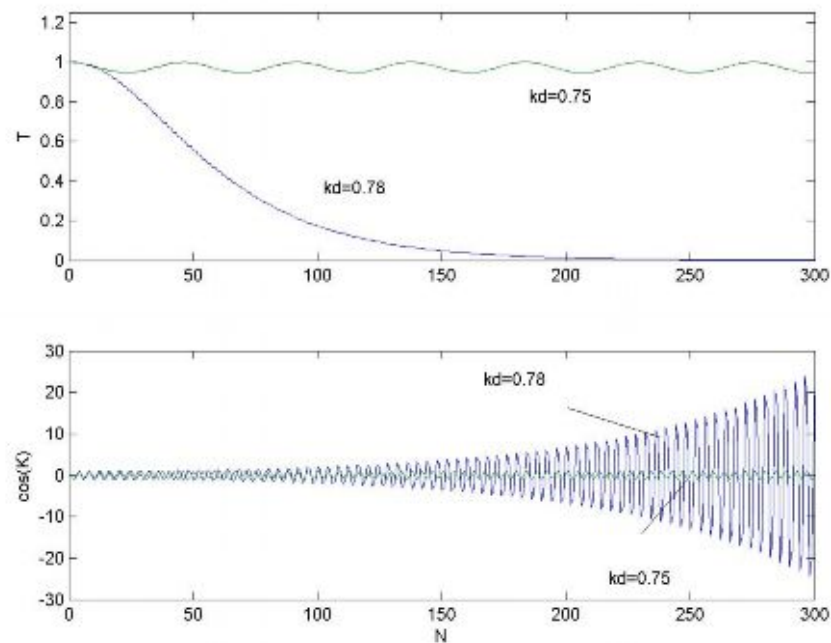


Рис. 4.5 - Залежність коефіцієнта проходження T та спектру $\cos K$ від числа шарів N ($\varepsilon_2/\varepsilon_1 = 1.2$)

Запропонований підхід без принципових труднощів може бути узагальнений на випадок гранульованих ланцюжків (і відповідних ДБЖ) з довільною кількістю елементів: коефіцієнти поширення електромагнітних хвиль, що поширюються в шаруватій періодичній системі, яка складається з двох компонент, обчислюються чисельно в залежності від вектора індукованої хвилі kd та числа шарів N представлені на Рис. 3.6 Аналіз даних показує, що в деяких частотних інтервалах (що відповідають забороненим смугам) гранульовані ланцюжки працюють у режимі фільтра, відсікаючи певну частину енергії, що передається хвилями. У цьому випадку поведінка передачі сильно залежить від симетрії системи [24].

Так, наявність у періодичній структурі системи навіть одиничного дефекту (шару з відмінною від ε_1 та ε_2 діелектричною проникністю ε_{def}) призводить до помітного зменшення коефіцієнта проходження поблизу межі зон та розширення забороненої зони. При певних значеннях параметрів на межі дозволеної та забороненої зон спостерігається дифузійний характер поширення електромагнітної хвилі вздовж осі гранульованого ланцюжка.

Слід зазначити, що аналогічні висновки містяться в роботі [25]. Узагальнення результатів, отриманих у випадку аперіодичних систем, можна також отримати за допомогою моделі гіпотетичної впорядкованої системи [26].

4.1 Матеріали для захисту від іонізуючих випромінювань медичної діагностичної апаратури

В даний час в медицині використовується широкий спектр Π як діагностичні методи дослідження внутрішніх органів людини. Методи магнітно-резонансної томографії (МРТ) і позитронно-емісійної томографії (ПЕТ) є діагностичними та дослідницькими інструментами, що активно розвиваються. ядерної медицини. В основі ПЕТ лежить можливість за допомогою спеціального детектуючого обладнання (ПЕТ-сканера)

відстежувати розподіл в організмі біологічно активних сполук, мічених позитрон-випромінюючими радіоізотопами [27] випромінювання. Наприклад, одноразове використання найпопулярнішої міченої сполуки (радіофармацевтичного препарату ^{18}F -FDG) для ПЕТ-нейровізуалізації та лікування онкологічних хворих, створює ефективну дозу опромінення 14 мЗв. Для порівняння максимальна робоча доза за рік для працівників атомної станції може досягати 50 мЗв.

Основним вражаючим фактором є гамма-випромінювання, яке виникає при анігіляції позитронів з електронами. Для ефективного екранування гамма-випромінювання при МРТ-ПЕТ діагностиці були визначені основні вимоги, що пред'являються до матеріалів [27]: обмежена сумісність щодо провідності; обмежена магнітна сумісність; високий коефіцієнт масового ослаблення (d/ρ , де d – товщина матеріалу; ρ – густина матеріалу); висока густина матеріалу. Іншим не менш важливим методом для дослідження внутрішніх органів людини століття є метод комп'ютерної томографії (КТ), заснований на вимірі і комп'ютерній обробці різниці ослаблення рентгенівського випромінювання різними за щільністю тканинами. Нині рентгенівська КТ є основним томографічним методом дослідження внутрішніх органів з використанням рентгенівського випромінювання. Однак під час проведення комп'ютерної томографії збільшується частота виникнення ушкоджень у ДНК. Під час проведення КТ доза випромінювання виявилася в 120 разів вище, ніж при одноразовому рентгенологічному обстеженні грудної клітки [28].

В даний час спектр матеріалів, що синтезуються, досить широкий, ряд з їх може бути перспективний для використання як екранів радіаційної захисту [29-33]. З метою захисту від електронного, рентгенівського і гамма-випромінювань використовують алюміній, залізо, мідь, вольфрам, свинець, силікатне скло та ін. зазвичай застосовують важкі елементи. Найбільш широко використовуваний важкий метал – свинець. Це високотоксичний матеріал із високими значеннями щільності ($\rho = 11,35 \text{ г/см}^3$). Застосування

його створює значні труднощі для екологічної обстановки під час виробництва та утилізації виробів радіаційного захисту.

Альтернативою даному матеріалу може бути вісмут. Він відноситься до розсіяних елементів. Там із вмістом $2 \cdot 10^{-5}$ % у земній корі і має низку незвичайних фізико-хімічних властивостей – низькими коефіцієнтом теплопровідності та поперечного сечення теплових нейтронів, порівняно високою хімічною стійкістю до окислення і нерозчинний у соляній кислоті без кисню. Вісмут нетоксичний і має невисоку вартість, широкі технологічні можливості його отримання роблять дуже актуальним його застосування як матеріал для радіаційного захисту. Особливо гостро проблема захисту від П стоїть під час КТ діагностики молочних та щитовидних залоз, т.к. вони дуже радіаційно-чутливі до рентгенівського випромінювання. У роботах [33–35] вивчено методи створення вісмутного захисту та розкриваються основні експлуатаційні характеристики.

Показано, що дані екрани мають високу ефективність екранування 30% і більше. При нанесенні оксиду вісмуту на легкі тканини можна забезпечити ступінь ослаблення рентгенівського випромінювання, аналогічний, як і у випадку свинцевого одягу.

Текстильні матеріали з частинками Bi_2O_3 застосовують при виготовленні спецодягу для медичного персоналу, що працює на рентгенівських та гамма-установках. Використання багат шарових структур, що містять шари на основі легень (Sn, Sb, Ba) та важких (W та Bi) елементів, на полімерній підкладці забезпечує ослаблення, еквівалентне випадку чистого свинцю, але на 25 % з нижчими масогабаритними параметрами. При цьому багат шарові структури забезпечують у 5 разів більше високе ослаблення, ніж свинцевий захист, при напрузі на рентгенівській трубці 50 кВ. Але це ефект поступово зменшується і за напрузі 150 кВ зникає.

Необхідно зазначити, що для створення ефективного радіаційного захисту товщина матеріалів екранів має становити близько 1 мм і більше. У зв'язку з цим було поставлено завдання розробки режимів електрохімічного

осадження для синтезу покриттів вісмуту товщиною 100–2700 мкм, дослідження їх структури.

4.2 Методика експерименту

Осадження покриттів вісмуту проводили з перхлоратного електроліту вісмутування [15] за наступних умов і складів розчину: вісмут (III) гідроксид 45 г/л, концентрована 65% хлорна кислота – 225 мл/л, желатин – 0,3–0,5 г/л, вода дистильована – до 1 л, температура – 20–25 °С, робоча щільність струму – 2,4–3,0 А/дм². Для поліпшення адгезії вісмутового покриття з алюмінієвою підкладкою перед осадженням вісмуту наносили підшар Ni-P хімічно осадженого. Анод - вісмутіві стриж- ні. Як джерело струму використовувався потенціостат ПІ-50.01.

Виготовлено дві партії експериментальних зразків екранів: перша партія для дослідження структурних властивостей покриттів – шість зразків із товщинами вісмуту 100, 200, 300, 400, 500 та 600 мкм (№ 1–6); друга партія визначення коефіцієнтів ослаблення електронів – шість зразків вісмуту з товщинами 972, 1340, 1598, 1952, 2236, 2640 мкм (№ 7-12). Як підкладки використовувалися алюмінієві пластини розмірами 40×40×0,4 мм.

Для покращення якості вісмутових покриттів (зниження внутрішньої напруги, підвищення пластичності) використаний ряд органічних добавок – резорцин, крезол, барвники (акридиновий жовтий та сафроніновий фіолетовий RV), оксіе- тильовані спирти (синтанол ДС-10, тритон X-100), желатин. Добавки вводилися в електроліт концентрації 1 г/л, як окремо, так і в поєднанні один з одним.

Дослідження морфології поверхні та мікроструктури вісмуту проводили на сканувальному електронному мікроскопі (SEM) LEO 1455VP. Перед дослідженнями експериментальні зразки піддавали очищенню в ультразвуковій ванні та поліруванні. Рентгенофазовий аналіз виконували на дифрактометрі PanAnalyticalEmperean з використанням

монохроматизованого Cu K α -випромінювання. Фазовий аналіз проводився під час зйомки зі швидкістю детектора 2 градуси на хвилину. Для визначення параметрів решітки здійснювався прецизійний запис дифракційних ліній, розташованих у дальній кутовій області з метою зменшення похибки вимірювання, зі швидкістю детектора 0,125 градуси за хвилину.

Товщину покриттів вісмуту (d) визначали гравіметричним методом. Наведену товщину екранів ($d_{пр}$) розраховували за формулою

$$d_{пр} = d\rho_{Ві} , \quad (4.14)$$

де $\rho_{Ві}$ – густина вісмуту.

Опромінення зразків проводилося на лінійному прискорювачі електронів ЕЛУ-4. Номінальна енергія електронів після вікна виводу становила $E_e = 4$ МеВ, флюєнс $\Phi = (0,5 \div 50) \cdot 10^{13}$ см $^{-2}$. Щільність потоку електронів контролювалася за допомогою циліндра Фарадея та становила $4 \cdot 10^{11}$ см $^{-2}$ з 1.

Як відомо [35], при радіаційному вплив коефіцієнт ослаблення випромінювання речовиною (за поглиненою дозою) істотно залежить від енергетичного спектру випромінювання. Для зниження енергії електронів між мішенню та вікном виведення електронів встановлювалася дюралюмінієва пластина товщиною 5 мм (рис. 4.6).

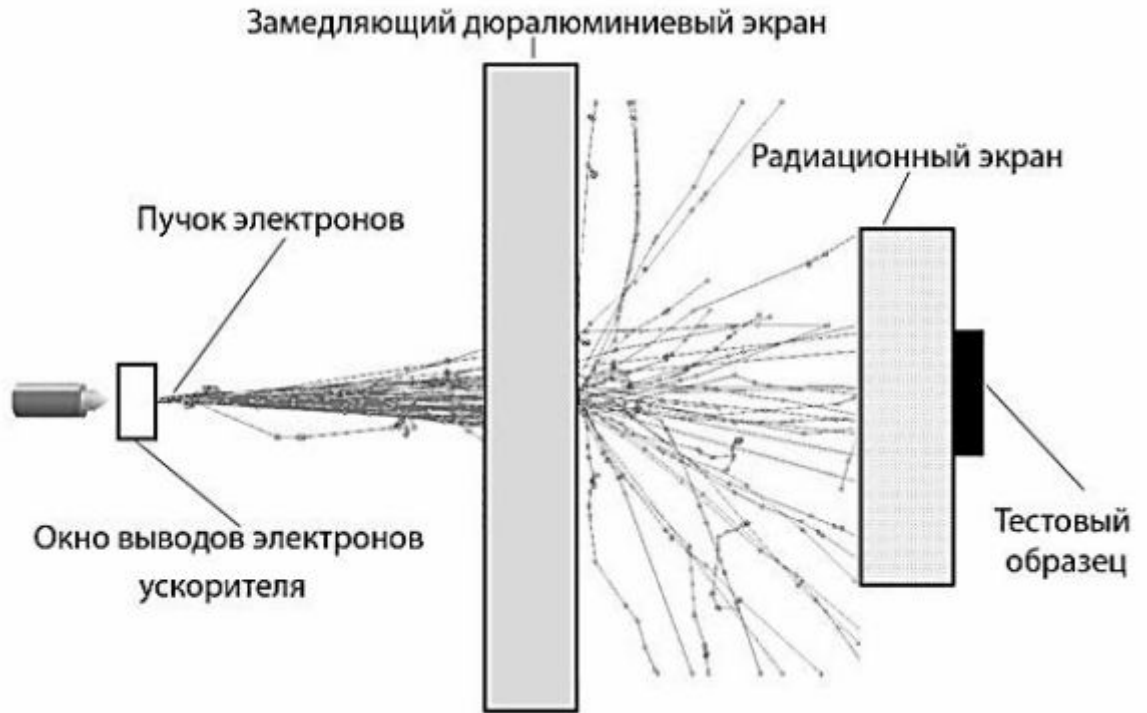


Рис. 4.6 - Схема випробувань радіаційних екранів

Пучок електронів, що виходить із вікна виведення прискорювача, падає на сповільнюючий дюралюмінієвий екран і далі, з енергією 1,6-1,8 MeV і супутнім гальмівним випромінюванням, спрямовується на досліджуваний радіаційний (захисний) екран, за яким встановлено тестовий зразок. Відстань від вікна виведення електронів до екрана, що уповільнює, становила 0,5 м, а до радіаційного екрана - 1 м. Коефіцієнт ослаблення потоків електронів радіаційними екранами визначали з відношення флюенсів падаючого на екран і потоків електронів, що пройшов через екран. Як тестові структури використовувалися транзисторні МОП-структури (елементи логічних КМОП ІМС IN74AC04N виробництва ВАТ «Інтеграл»). Даний метод визначення поглиненої дози випромінювання заснований на зміні радіаційно-чутливих параметрів МОП-транзисторів (МОПТ) і є досить зручним з точки зору практичної реалізації. Вимірювання сток-затворних вольтамперних

характеристик (ВАХ) тестових р-МОПТ-структур проводилися до та після кожної дози опромінення за допомогою вимірювача параметрів напівпровідникових приладів ППСШ-1/6. Поглинена доза визначалася за величиною зсуву ВАХ – зміни падіння порогової напруги (ΔU) при струмах витоку $I_c = 10^{-7}$ А для р-МОПТ. Для кожної дози електронного випромінювання використовувалася окрема мікросхема. Значення ΔU усереднювалися шістьма транзисторами. Для знаходження поглиненої дози випромінювання, що пройшло, захисний екран розраховувалося значення ΔU для р-МОПТ, захищеної екраном, а для поглиненої дози падаючого на захисний екран випромінювання – мікросхеми, не захищеної екраном. Значення коефіцієнта екранування (коефіцієнта ослаблення) (K_e) визначали із співвідношення:

$$K_e = \Phi / \Phi_0, \quad (4.15)$$

де Φ – флюєнс електронів, що відповідає параметричній відмові тестової приладової структури, захищеної екраном; Φ_0 – флюєнс електронів, що відповідає параметричному відмову тестової приладової структури без екрана. Параметрична відмова фіксувалася при зміні порогової напруги $\Delta U = 0,05$ В

Структура покриттів вісмуту. Вісмут є важким елементом з порядковим номером 83 масовим числом 208,98 і щільністю $9,747$ г/см³. На рис. 4.7 при- ведені рентгенівські спектри покриттів вісмуту різної товщини (партія 1), отриманих з електроліту, який не містить органічних добавок. Зі збільшенням товщини покриття кількість рефлексів збільшується, проте їх інтенсивність падає, що свідчить про формування кристалітів різної орієнтації. Згідно з проведеними оцінками кам товщина шару, що бере участь у формуванні дифракційної картини становить приблизно 5 мкм. За даними рентгенівської дифракції структура всіх зразків покриттів вісмуту характеризува- лася ромбоєдричним типом кри- сталевих ґрат. Покриття вісмуту, отримані з електроліту без добавок, мають яскраво виражену

текстуру (012). Ця текстура зберігається і при введенні в електроліт органічних добавок – крезолу, резор-цину, желатину, синтанолу.

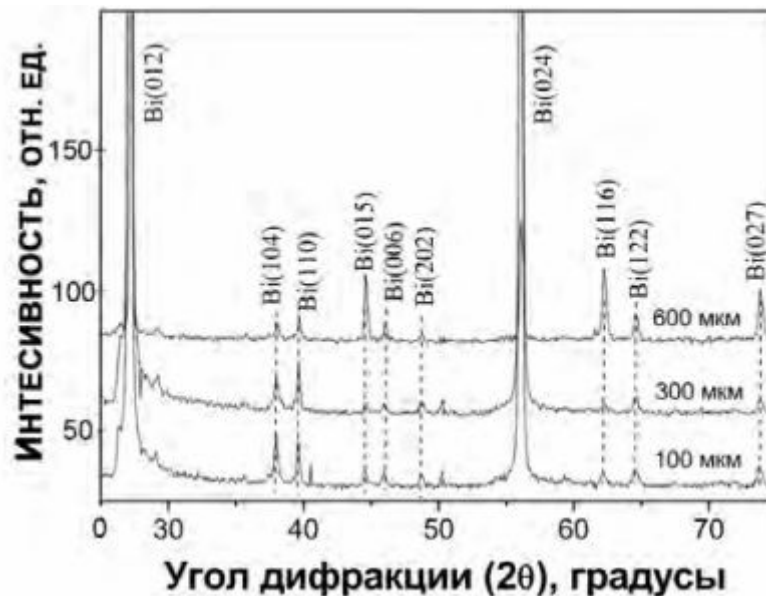


Рис. 4.7 - Спектри рентгенівської дифракції покриттів Ві товщиною 100, 300 та 600 мкм

Покриття вісмуту, що сформувалися, товщиною 100 мкм мають крупнозернисту будову (рис. 4.8, а). Зерна у вигляді дендридів розмірами від 10 до 30 мкм мають огранену форму та різкі межі. Оскільки поздовжні розміри зерен можна порівняти з товщиною покриттів, мабуть, можна вважати, що на рис. 3 а представлений перший шар вісмуту, вирощений на алюмінієвій підкладці. Зі збільшенням товщини покриття характер морфології поверхні значно змінюється. При товщини 300 і 600 мкм покриття вісмуту позбавлені дендридів (рис. 4.8, б, в). СЕМ зображення поверхні являє собою сукупність великомасштабної складової з овальними утвореннями розмірами від 80 до 120 мкм і дрібнозернистою складовою із кристалітами розмірами від 4 до 12 мкм.

Вивчення морфології поверхні зразків, обложених з перхлоратного електроліту, що містить і не містить органічні добавки, методом СЕМ показало, що без добавок формуються великокристалічні плівки з розміром

зерен у десятки мікронів (рис. 4.8, а). При введенні в електроліт таких добавок, як резорцин, крезол, желатин та синтанол, спостерігається помітне зменшення розміру кристалітів, що у ряді випадків супроводжується підвищенням пластичності осажденного покриття. Особливо сильно розмір кристалітів зменшується до 2÷6 мкм при комбінованому введенні електроліт добавок; ефективні такі комбінації: синтанол+резорцин, желатин+крезол, желатин+резорцин (рис. 4.8, д, е).

У присутності деяких органічних добавок, таких як RV, акридиновий жовтий, при осадженні формуються великокристалічні покриття вісмуту, що містять сукупність витягнутих зерен зі складною формою та різкими гранями (Рис. 4.8, е).

При цьому текстура зростання покриттів вісмуту змінюється з орієнтації (012) на орієнтацію (110) (рис. 4). Характерно, що така зміна текстури спостерігається лише для покриттів, отриманих із застосуванням добавки RV у досить вузькому діапазоні густин струму від 1,5 до 2,0 А/дм².

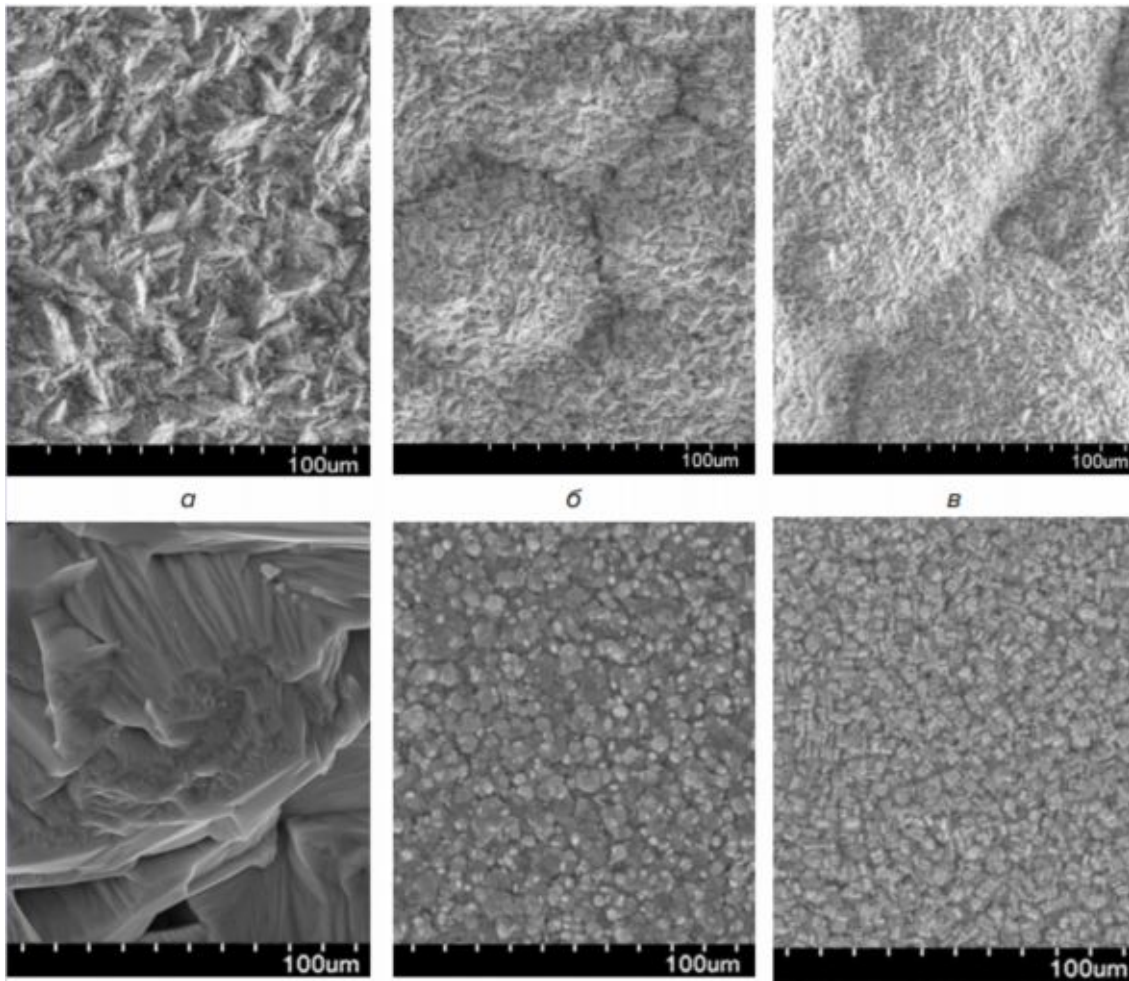


Рис. 4.8 РЕМ-зображення поверхні зразків з покриттями вісмуту товщиною 100 мкм (а), 300 мкм (б) та 600 мкм (в), отримані з перхлоратного електроліту без добавок та з добавками різної природи (товщина 100 мкм): добавка RV(г), желатин + резорцин (д), желатин + крезол (е)

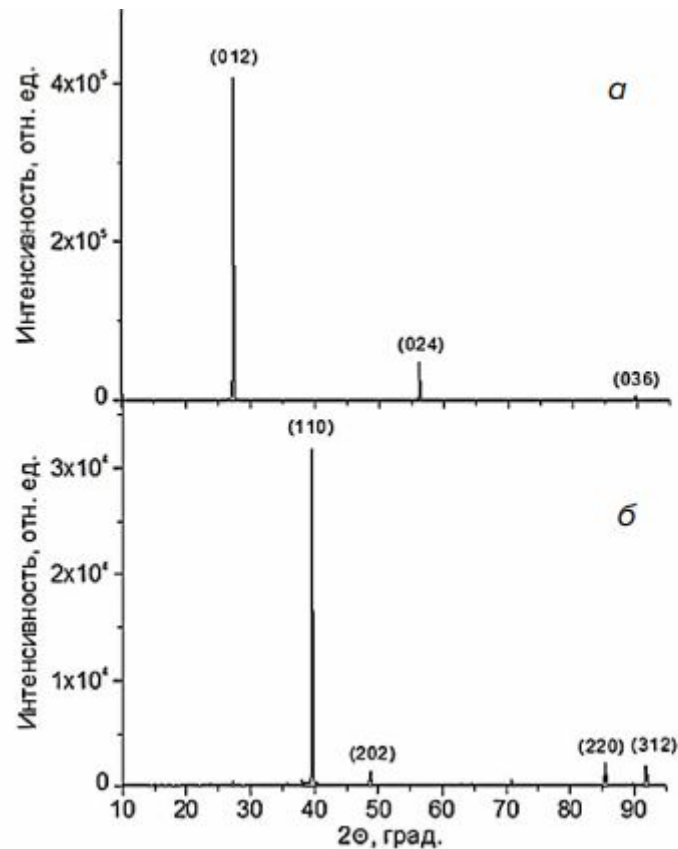


Рис. 4.9 - Рентгенограми вісмутівих покриттів, обложених з електроліту без добавок (а) та з добавкою RV (5 г/л) (б)

Радіаційно-захисні властивості покриттів вісмуту. Загальним у зміні стокзатворних характеристик ВАХ тестових структур р-МОПТ при опроміненні електронами є зсув у бік негативних значень напруги зі зростанням дози опромінення. Спостерігається також дещо нехарактерне для р-МОПТ зростання струмів витоку зі збільшенням флюєнсу. Зміни характеристик транзисторів пов'язані із захопленням вільних носіїв заряду на глибокі центри обсягом діелектрика з утворенням поверхневих станів на межах розділу діелектрик – напівпровідник. Захоплення носіїв заряду обсягом SiO_2 і рівні поверхневих станів викликає зсув порогових напруг, а збільшення щільності поверхневих станів призводить до додаткового розсіювання рухомих носіїв заряду та зменшення крутизни сток-затвора ВАХ МОПТ. Зростання струмів витоку р-МОПТ із збільшенням флюєнсу обумовлене відповідним зростанням струмів витоку захисних діодів на вході та виході мікросхем.

На рис. 4.10 а представлена залежність зсуву порогової напруги ΔU (по абсолютній величині) від флюєнса електронного опромінення незахищеною екраном тестової структури 3 отриманих результатів було визначено флюєнс електронів, у якому настає параметричний відмова незахищеного екраном р-МОПТ. Значення, що фіксується, параметричної відмови $\Delta U = 0,05$ В відповідає флюєнс електронів порядку $\Phi_0 = 2,3 \cdot 10^{12}$ cm^{-2} .

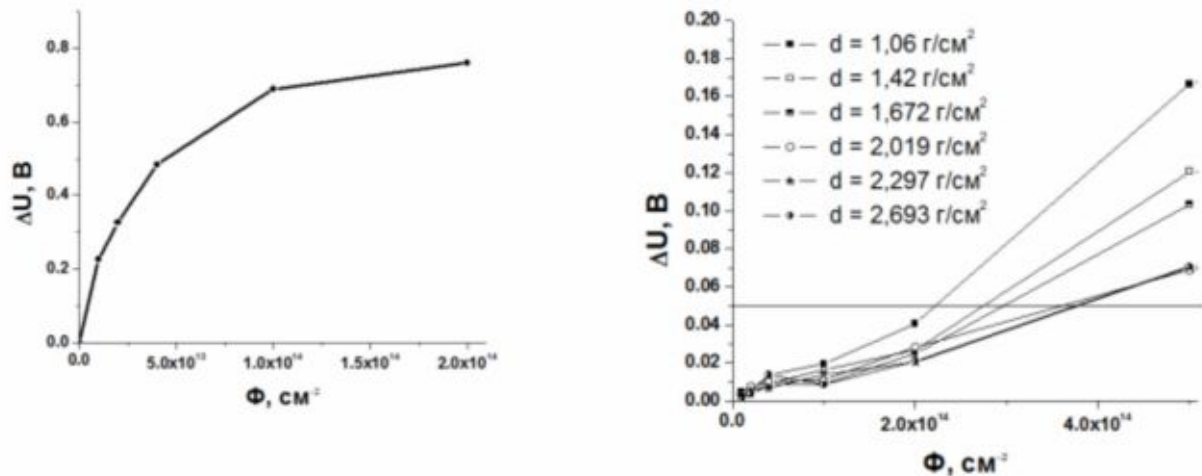


Рис. 4.10 Зміна порогової напруги ΔU для р-МОПТ при опроміненні електронами мікросхеми, не захищеної екраном (а) та захищеною екранами на основі вісмуту з різною наведеною товщиною (б)

На рис. 4.10 б показані залежності зсуву порогової напруги при опроміненні електронами р-МОПТ, захищених екранами на основі вісмуту. Для всіх захищених екранами МОПТ спостерігається зростання ΔU у всьому досліджуваному діапазоні флюєнсів електронного опромінення. Однак при тих самих значеннях флюєнса електронів зміни порогової напруги істотно менше для захищених зразків у порівнянні з незахищеними зразками. При цьому цей ефект посилюється із збільшенням товщини вісмутового екрану. З результатів, поданих на рис. 4.10, б, слід, що всі використовувані екрани мають досить високі значення коефіцієнтів ослаблення. Оцінимо із співвідношення (2) величину K_e для тестових структур за умови параметричної відмови при $U = 0,05$ В. Результати розрахунків значень K_e

зразків екранів № 7-12 на основі вісмуту в залежності від наведеної товщини наведено у таблиці 4.1

Таблиця 4.1 - Флюенс електронів, що відповідає параметричному відмову ($\Delta U = 0,05$ В) тестової приладової структури та значення коефіцієнта ефективності екранування K_e зразків екранів на основі вісмуту з різною наведеною товщиною

Номер екрана	Приведенная толщина экрана, г/см ²	Значение Φ , см ²	$K_e = \Phi/\Phi_0$
7	1,1	$2,2 \cdot 10^{14}$	95
8	1,4	$2,7 \cdot 10^{14}$	117
9	1,7	$3,0 \cdot 10^{14}$	130
10	2,0	$3,6 \cdot 10^{14}$	156
11	2,3	$3,8 \cdot 10^{14}$	162
12	2,7	$3,8 \cdot 10^{14}$	165

Як видно з даних таблиці, значення K_e збільшуються зі зростанням наведеної товщини екранів. При цьому збільшення товщини вісмуту до значень $d_{пр} = 2,0$ г/см² значно сильніше відбивається на зміні K_e ніж при $d_{пр} > 2,0$ г/см². Загалом залежності K_e ($d_{пр}$) можна апроксимувати поліномом другого ступеня

$$K_e = A + B_1 d_{пр} + B_2 d_{пр}^2,$$

(3) де $A = -28,046$; $B_1 = 137,15884$; $B_2 = -23,9592$.

Аналіз отриманих результатів показує, що вже за товщині екрану $d_{пр} = 1,7$ г/см² досягається ослаблення накопиченої зразком дози $K_e = 130$ разів. Надмірне нарощування товщини вісмуту не дає явного виграшу у радіаційно-захисних властивостях екранів. Можна зробити висновок, що найбільш оптимальними для захисту від електронів з точки зору масогабаритних параметрів є екрани з товщинами вісмуту порядку $1,7 \div 2,0$ г/см².

Зіставлення ВАХ тестових ІМС, виміряних в умовах захисту екранами на основі вісмуту та свинцю з еквівалентними значеннями наведених товщин ($d_{пр} = 1,6 \text{ г/см}^2$) показали, що при впливі потоків електронів дозами до $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ зміни порогової напруги для вісмуту і свинцю дуже близькі.

Спостерігається в експерименті характер залежностей K_e ($d_{пр}$) обумовлений взаємодією електронів та гальмівного випромінювання з речовиною. При збільшенні товщини екранів в діапазоні значень $d_{пр} \leq 2,0 \text{ г/см}^2$ ефективно знижує внесок електронної складової в поглинену дозу зразка, що захищається, що і спостерігається в експерименті (див. рис. 5, б і таблицю).

При значеннях $d_{пр} \approx 2,0 \text{ г/см}^2$ усі електрони розсіюються матеріалом екрана. В цьому випадку і при $d_{пр} > 2,0 \text{ г/см}^2$ внесок у поглинену дозу вносять вторинні види випромінювань, переважним з яких є гальмівне випромінювання. Останнє має високу проникаючу здатність, та захист від нього виробів електронної техніки за допомогою екранів локального захисту стає малоефективною. Тому при досягненні певних значень наведеної товщини екранів ($d_{пр} \approx 2 \text{ г/см}^2$) та подальшому її зростанні перебіг залежностей $\Delta U = \Delta U(\Phi)$ для $d_{пр} = 2,0; 2,3$ і $2,7 \text{ г/см}^2$ практично збігається (рис. 5, б) та значення K_e трохи відрізняються один від одного.

Показано умови електрохімічного осадження та структуру покриттів вісмуту. Отримано партії зразків покриттів завтовшки від 100 до 2640 мкм, що мають ромбоєдричний тип кристалічних ґрат. Показано, що введення в перхлоратний електроліт органічних добавок – RV, акридинового жовтого – призводить до зміни текстури з орієнтації (012) на орієнтацію (110); введення органічних добавок – резорцину, крезолу, желатину та синтанолу – сприяє подрібненню мікроструктури та зменшенню розмірів зерен від $80 \div 120$ мкм до $2 \div 6$ мкм, супроводжується підвищенням пластичності покриттів. Дослідження радіаційно-захисних властивостей екранів на основі вісмуту при опроміненні тестових структур р-канальних МОПТ (елементів КМОП ІМС) електронами з енергією 1,6–1,8 MeV та експозиційними дозами до

$5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ показали, що зі зростанням значень наведеної товщини $d_{\text{пр}}$ від 1,1 до $2,7 \text{ г/см}^2$ величина коефіцієнта ефективності екранування K_e зростає від 95 до 165. Найбільш оптимальними, з погляду масогабаритних параметрів, є значення $d_{\text{пр}}$ порядку $1,7 \div 2,0 \text{ г/см}^2$. Збільшення товщини екранів більше 2 г/см^2 не призводить до суттєвого зростання K_e , що обумовлено переважним вкладом у поглинену дозу зразків гальмівного випромінювання, що захищаються.

ВИСНОВКИ

Дослідження матеріалів із композитною структурою для захисту від радіаційного випромінювання є актуальним та важливим напрямком в сучасній науці та технології. З урахуванням теоретичних аспектів радіаційного випромінювання та властивостей композитних матеріалів, можливо розробити ефективні захисні рішення.

Аналіз основних класів композитних матеріалів та їх властивостей для захисту від радіаційного випромінювання дозволяє визначити оптимальний вибір матеріалів для конкретних умов. Технології виготовлення композитів відіграють ключову роль у забезпеченні необхідних характеристик та ефективності захисту.

Вивчення властивостей матеріалів із композитною структурою, зокрема їхньої електромагнітної та структурної природи, дозволяє розробити математичні моделі та методи теоретичних розрахунків ефективності захисту. Використання методів, таких як Метод Монте-Карло та моделювання впливу композитів на випромінювання, розширює можливості досліджень.

На основі отриманих результатів можна визначити, що розглядуваний композитний матеріал виявляє високу ефективність у захисті від радіаційного випромінювання. Його комплексні електромагнітні та структурні властивості грають ключову роль у цьому процесі.

Потенційні можливості для вдосконалення включають детальніший аналіз впливу різних компонентів матеріалу, врахування інших видів випромінювання та експериментальну валідацію моделі для підтвердження її точності. Розгляд таких аспектів може сприяти подальшій оптимізації та розробці композитних матеріалів для ефективного захисту від радіаційного випромінювання.

Розгляд характеристик поглиблення радіації композитами та розрахунків ефективності для різних видів матеріалів дозволяє визначити їхню придатність для конкретних застосувань та порівняти їхні властивості.

Усе вищезазначене формує теоретичну базу для подальших досліджень та розробки нових матеріалів із композитною структурою, спрямованих на створення ефективних систем захисту від радіаційного випромінювання.

Для майбутніх досліджень у галузі матеріалів із композитною структурою для захисту від радіаційного випромінювання рекомендується звернути увагу на наступні аспекти:

Розширення Типів Випромінювання:

- Дослідження впливу матеріалів на різні види радіації, включаючи альфа-, бета- та нейтронне випромінювання.

Оптимізація Складу та Структури:

- Дослідження впливу різних складів композитів та їхньої структури на ефективність захисту.
- Оптимізація співвідношення компонентів для досягнення максимальної ефективності.

Дослідження Ефективності на Різних Енергетичних Рівнях:

- Вивчення ефективності захисту на різних енергетичних рівнях радіації та адаптація матеріалів для різних умов.

Вивчення Зміни Властивостей з Часом:

- Дослідження стійкості та тривалості властивостей композитних матеріалів під впливом радіації з плином часу.

Врахування Реальних Умов:

- Розробка моделей, що враховують реальні умови експлуатації, включаючи температурний вплив та механічне навантаження.

Експериментальне Підтвердження Розрахунків:

- Проведення експериментів для підтвердження розрахункових результатів та оцінка практичної застосованості розроблених матеріалів.

Врахування Індивідуальних Властивостей Матеріалів:

- Розгляд індивідуальних властивостей компонентів композиту та їх взаємодію з радіацією.

Ці напрямки досліджень можуть допомогти розвинути та оптимізувати матеріали для більш ефективного захисту від радіаційного випромінювання

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. К. Б. Денисевич, Ю. О. Ландау, В. О. Нейман, В. М. Сулейманов, Б. А. Шиляев. Энергетика: історія, сучасність і майбутнє. Кн. 4 : Розвиток атомної енергетики та об'єднаних енергосистем; Наук. ред. Ю. О. Ландау, І. Я. Сігал. — 2013. — 303 с.
2. Дементьев Б. А. Ядерные энергетические реакторы. Учебник для вузов — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 2010. — 352 с.
3. Герасимов О.І. Теоретичні основи технологій захисту навколишнього середовища: навчальний посіб. / Одеськ. держ. екол. ун-т. Одеса: ТЕС, 2018. 228 с.
4. В. М. Шестопапов, П. В. Замостян «Обращение с радиоактивными отходами в Украине: проблемы, опыт, перспективы» - Киев 2008. - 120с.
5. В. І. Савуляк, О.В Березюк // Технічне забезпечення збирання перевезення та підготовки твердих побутових відходів монографія – м. Вінниця -2006—242 с
6. Баженов Ю.М. Технология бетонных и железобетонных изделий / Ю.М. Баженов, А.Г. Комар. — Москва : Стройиздат, 1984. — 672 с.
7. Баженов Ю.М. Бетнополимеры / Ю.М. Баженов. — Москва : Стройиздат, 1983. — 472 с.
8. Материаловедение : учебник / [Арзамасов Б.Н. и др.] ; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. —2-е изд. — Москва : Машиностроение, 1986. — 384 с.
9. Степанова В.Ф. Арматура композитная полимерная / В.Ф. Степанова, А.Ю. Степанов, Е.П. Жирков. — Москва : Бумажник, 2013. — 200 с.
10. Рабинович Ф.Н. Дисперсно-армированные бетоны / Ф.Н. Рабинович. — Москва : Стройиздат, 1989. — 176 с.
11. Козаченко А.М. Общая технология производства древесных плит : учеб. пособие / А.М. Козаченко, Б.Д. Модлин. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Высшая школа, 1990. — 144 с.

12. Матусевич А.С. Композиционные материалы на металлической основе / А.С. Матусевич. Минск : Наука и техника, 1978. — 216 с.
13. Наназашвили И.Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции / И.Х. Наназашвили. — 2-е изд., перераб. и доп. — Ленинград : Стройиздат, 1990. — 415 с.
14. Васильев В.В. Композиционные материалы : справочник / В.В. Васильев, Ю.М. Тарнопольский. — Москва : Машиностроение, 1990. — 512 с.
15. Bentur A. Fibre Reinforced Cementitious Composites / A. Bentur, S. Mindess. — London and New York : Taylor and francis group, 2007. — 625 p.
16. Гутников С.И. Стеклые волокна : учеб. пособие / С.И. Гутников, Б.И. Лазорьяк, А.Н. Селезнев. — Москва : МГУ, 2010. — 53 с.
17. Шевченко В.Г. Основы физики полимерных композиционных материалов : учеб. пособие /В.Г. Шевченко. — Москва : МГУ, 2010. — 99 с.
18. Карпинос Д.М. Полимеры и композиционные материалы на их основе в технике /Д.М. Карпинос, В.И. Олейник. — Киев : Наукова думка, 1981. — 180 с.
19. Мельникова Л.В. Технология композиционных материалов из древесины : учебник /Л.В. Мельникова. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : МГУЛ, 2004. — 234 с.
20. Кураев Г.А., Войнов В.Б., Моргалев Ю.Н. Влияние электромагнитного излучения персональных компьютеров на организм человека [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.dc.tsu.ru/webdesign/tsu/Library.nsf/designobjects/vestnik269/\\$file/9_15Kuraev.pdf](http://www.dc.tsu.ru/webdesign/tsu/Library.nsf/designobjects/vestnik269/$file/9_15Kuraev.pdf)
21. Савицкая Я.А., Паслен В.В. Влияние высокочастотных электромагнитных полей на организм человека // Экологія та ноосферологія. — 2009. — № 1, 2. — Т. 20. — С. 38–43.

22. Савицька Я.А., Пасльон В.В. Вплив високочастотних електромагнітних полів на живі організми // Екологія та ноосферологія. – 2009. – № 3, 4. – Т. 20. – С. 47–50.
23. Мартынюк В.С., Цейслер Ю.В., Темурьянц Н.А. Интерференция механизмов влияния слабых электромагнитных полей крайне низких частот на организм человека и животных // Геофизические процессы и биосфера. – 2012. – № 2. – Т. 11. – С. 16–39.
24. Тиханков Н.В., Тиханков Е.Н., Плешко Э.А. Информационные методы нейтрализации негативного влияния «электромагнитного смога» // Науковий вісник міжнародного гуманітарного університету: зб. наук. праць. Серія «Інформаційні технології та управління проектами». – Одеса, 2012. – № 4. – С. 83–85.
25. Черный А.П., Никифоров В.В. Об электромагнитной совместимости электромеханических и биологических систем // Інженерні та освітні технології в електротехнічних і комп'ютерних системах. – Кременчук: КрНУ, 2013. – № 1 (1). – С. 140–149 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://eetecs.kdu.edu.ua>
26. Подобєд І.М. Про протилежні властивості одного й того ж випромінювання та його вплив на працівника // Проблеми охорони праці в Україні: зб. наук. праць. – Київ, 2012. – № 23. – С. 90–95.
27. The role of magnetic susceptibility in magnetic resonance imaging: MRI magnetic compatibility of the first and second kinds / J.F. Schenck [et al.] // Med. Phys. – 1996. – Vol. 23, P. 815–850.
28. Stanford University Medical Center, DNA damage seen in patients undergoing CT scanning, study finds / Stanford University Medical Center // ScienceDaily – Standfort – <http://www.sciencedaily.com/releases/2015/07/150722144634.htm>).
29. Борц, Б. В.. Моделирование прохождения электронов через слоистый композиционный материал /Б. В. Борц, И. Г. Марченко, П. Н. Бездверный // Вопр. атом.науки и техники. Сер.: Физика радиационных

- повреждений и радиационное материаловедение (94). – 2009. – Вып. 3 – С. 175–177.
30. Першенков, В. С. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем / В. С. Першенков, В. Д. Попов, А. В. Шальнов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 256 с.
31. Nikiforov, A. Y. Simulation of Space Radiation Effects in Microelectronic Parts / A. Y. Nikiforov, A. I. Chumakov // Effects of Space Weather on Technology Infrastructure. – Kluwer Academic Publishers, 2004. – P. 165–184.
32. McCollough, C. Point/counterpoint. The use of bismuth breast shields for CT should be discouraged /C. McCollough, J. Wang, R. Gould, C. Orton // Med. Phys. – 2012. – Vol. 39, № 5. – P.2321–2324.
33. Mendes, M Assesment of patient dose reduction by bismuth shielding in CT using measurments GENAT4 and MCNPX simulations / M. Mendes [et al.] // Radiation protection dosimetry. – 2015. – № 165. – P.175–181.
34. Kim, S. Dosimetric characterization of bismuth shields in CT: measurements and Monte Carlo simulations / S. Kim [et al.] // Radiation protection dosimetry. – 2009. – Vol.113. – № 2. – P.105–110.
35. Morford, K. Bismuth shielding during CT exams: a literature review / K. Morford, L. Watts // Radiology management. – 2012. – P.45–47.