

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет магістерської та
аспірантської підготовки

Кафедра загальної та теоретичної фізики

Магістерська кваліфікаційна робота

на тему: «ТЕХНОЛОГІЇ ТА МОДЕЛЬ РАДІАЦІЙНОГО ЕКРАНУ НА ОСНОВІ
ГРАНУЛЬОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗАДАЧ РАДІАЦІЙНОГО
УБЕЗПЕЧЕННЯ»

Виконала студентка 2 курсу групи МТЗ-2
спеціальності 183 «Технології захисту
навколишнього середовища»

Карабіненко Юлія Олександрівна

Керівник д.ф.-м. н., професор
Герасимов Олег Іванович

Рецензент д.ф.-м.н. професор
Скалозубов В.І.

Одеса 2018

МІНІСТРЕСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет магістерської та аспірантської підготовки

Кафедра загальної та теоретичної фізики

Рівень вищої освіти магістр

Спеціальність 183 Технології захисту навколишнього середовища

(шифр і назва)

(наказ № 271-С, від 05.10.2018)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри загальної

та теоретичної фізики

Герасимов О. І.

“ 29 ” 10 2018 р.

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Карабіненко Юлія Олександрівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: *Технології та модель радіаційного екрану на основі гранульованих матеріалів для задач радіаційного убезпечення*

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

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

затвердженні наказом вищого навчального закладу від «5» жовтня 2018 року № 271-С

2. Срок подання студентом роботи 10 грудня 2018 р.

3. Вихідні дані до роботи

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

1. Огляд стану проблеми захоронення радіоактивних відходів. 2. Фізичні властивості гранульованих матеріалів. 3. Теоретична модель захисного екрану на базі багатоканальної дифузії. 4. Розсіяння хвиль в багато центровій системі захисного екрану. 5. Економічні висновки, співпраця України з організацією МАГАТЕ та охорона праці в сфері поводження з радіоактивними матеріалами.

4. Перелік графічного матеріалу (з точним значенням обов'язкових креслень):

Рис. 1.1 Схематичне зображення шарово-періодичної поглинаючої структури.

Рис 1.2. Скетч-схема для умовної демонстрації взаємодії опромінення з гранульованим шаром речовин. Рис. 3.1— Графіки розподілу $Q_{\beta}(z)$ для різних значень $\beta=0,65 - 0,95$.

Таблиця 5.1 — Порівняльна економічна характеристика двох варіантів конструкцій екранів на базі бетонних споруд та на базі використання гранульованих матеріалів.

Дата видачі завдання 29.10.2018 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів дипломного проекту (магістерської роботи)	Термін виконання етапів роботи	Відмітка про виконання	
			За 4- х бальн ою шкал ою	%
1	Огляд новітніх літературних джерел за темою дипломного проекту	3 1.10.2018		
2	Узагальнення основних теоретичних положень проекту	29.10.2018		
3	Розробка основних положень та формулювання висновків	19-24.11.2018		
4	Попередній захист кваліфікаційної роботи	24.12.2018		
5	Перевірка на плагіат	13-14.12.2018		
6	Рецензування	19-20.12.2018		
7	Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)			

Магістр _____ **Карабіненко Ю.О.**

Керівник проекту _____ **Герасимов О.І. д. ф-м.н.проф.**

АНОТАЦІЯ

«Технології та модель радіаційного екрану на основі гранульованих матеріалів для задач радіаційного забезпечення»

Актуальність роботи. В даному проекті були запропоновані теоретичні обґрунтування всіх можливих природних явищ, виникаючих в гранульованих матеріалах – в гранульованій матриці, як моделі захисного екрану. Також нами були виконані практичні схеми розміщення шарів захисту та моделі контейнерних модулів. В цьому проекті також було виконане економічне обґрунтування та рекомендації по безпечній експлуатації, а також запропоновані показники якості та надійності виготовлення моделі екрану.

Мета роботи – визначити всі важливі характеристики структури, параметри та теоретичні довідки з проектування та втілення в практику моделей захисних екранів, а також дослідити економічне обґрунтування нових моделей екранів та втілити всі певні рекомендації.

Ключові слова: екран, модель, гамма-випромінювання, гранульовані матеріали, фракційна дифузія, матриця, забезпечення.

Научний керівник: д.ф-м. н., професор Герасимов О. І.

Робота містить:

Сторінок - 105

Таблиць – 1

Рисунків - 2

Літературних посилань - 14

SUMMARY

«Technologies and model of radiation screen on the basis of stripped materials for radiation safety problems»

Actuality of work. In this project, theoretical substantiation of all possible natural phenomena, the emergence of others in granular materials - granular matrix as a model of a protective screen, was proposed. We also implemented practical layouts for the layers of protection and container module models. This project also provided economic justification and recommendations for safe operation, as well as suggested indicators of quality and reliability of the production of the screen model.

The purpose of the work is to identify all important characteristics of the structure parameters and theoretical references on the design and implementation of protective screen models, as well as the feasibility study of new screen models and the implementation of all the specific recommendations.

Keywords: screen, model, gamma radiation. granular materials, fractional diffusion, matrix.

The work contains:

Pages — 105

tables — 1

references — 14

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ	10
1.1 Огляд стану проблеми	10
1.2 Безпека та сучасний стан поводження з відпрацьованим ядерним паливом на Україні.....	12
1.3 Вертикальна міграція радіонуклідів у ґрунті.....	17
1.4 Кінетичний опис гранульованих матеріалів.....	19
1.5 Загальні уявлення про поглинальні уявлення гранульованих матеріалів	24
1.6 Природні та штучні гранульовані матеріали.....	27
2 ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГРАНУЛЬОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	30
2.1 Деякі специфічні фізичні властивості.....	31
3 ТЕОРЕТИЧНА МОДЕЛЬ ГРАНУЛЬОВАНОГО ЗАХИСНОГО ЕКРАНУ НА БАЗІ ПРИНЦИПІВ БАГАТОКАНАЛЬНОЇ ДИФУЗІЇ.....	34
3.1 Кінематична дифузія частинки.....	34
3.1.1 Статистика дифундируючої частинки.....	36
3.1.2 Незалежні зіткнення.....	38
3.1.3 Асимптотичні закони дифузії.....	39
3.1.4 Дробове дифузійне рівняння.....	44
3.1.5 Процес дробного зносу.....	45
3.2 Дифузія в пакеті паралельних каналів.....	51
3.3 Зауваження щодо дифузії при послідовній морфології каналів.....	54
3.4 Дифузія в однорідному середовищі, що містить окремі великі включення простої форми.....	59
3.5 Дифузія в макронеоднорідних дисперсійних середовищах.....	61
4 РОЗСІЯННЯ ХВИЛЬ В БАГАТОЦЕНТРОВІЙ СИСТЕМІ ЗАХИСНОГО ЕКРАНУ.....	65
4.1 Аналіз розсіяння плоскої хвилі за допомогою координат зсуву.....	65

4.2 Розсіяння на окремих сферах.....	69
5 ЕКОНОМІЧНІ ВИСНОВКИ, СПІВПРАЦЯ УКРАЇНИ З ОРГАНІЗАЦІЄЮ МАГАТЕ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ В СФЕРІ ПОВОДЖЕННЯ З РАДІОАКТИВНИМИ МАТЕРІАЛАМИ.....	71
5.1 Економічні висновки.....	71
5.2 Співпраця України та міжнародної організації МАГАТЕ.....	72
5.3 Охорона праці та правові заходи в галузі ядерної енергетики.....	84
5.4 Охорона праці в галузі ядерної енергетики.....	92
ВИСНОВКИ.....	103
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	105

ВСТУП

В сучасному світі во всіх країнах, де використовують ядерну енергетику, найважливішим питанням є утилізація та убезпечення відпрацьованих радіоактивних речовин як рідких так і твердих. Методи та матеріали, що використовують для екранування контейнерів та захисту від шкідливих наслідків зберігання відходів є різними. В даній магістерській роботі ми розглянемо як концепцію так і фізичні процеси, які визначають параметри та властивості гранульованих захисних екранів.[1]

Момент в історії людства, коли людина змогла приборкати та використовувати для своїх цілей ядерну енергію, одночасно з переломним в існуванні всього життя на планеті. В сьогодні ми часто чуємо про нові відкриття в сфері ядерних технологій. Вміння використовувати атомну енергію дозволило людству на довгі роки вирішити питання запасів енергії та забути про енергетичну кризу. Але такий прорив в атомній енергетиці став вельми небезпечною екологічною проблемою.

Зокрема, з розвитком атомної промисловості виникла низка проблем по переробці та утилізації радіоактивних відходів, але шляхів її безпечного використання до ефективних досі не знайдено. Одночасно з розвитком атомної енергетики йде інтенсивний пошук оптимальних промислових методів утилізації радіаційних відходів, та убезпечення від них людини та довкілля. [1]

Сьогодні в світі основним джерелом утворення радіоактивних відходів є атомні електростанції та реактори. Також джерелами радіоактивних відходів є досить чисельні науково-дослідницькі організації, промислові підприємства, лабораторії та медичні заклади. У зв'язку з цим необхідно прийняти всебічні заходи радіаційної безпеки, не лише персоналу, який працює з радіонуклідами, але й всього населення цих небезпечних зон і в цілому довкілля. Ці заходи є важливою складовою захисту природного середовища та людини від радіоактивних забруднень. Найважливіша

проблема – це тривала потенційна небезпека при переробці всіх небезпечних радіаційних відходів.

В роботі будуть проаналізовані методи екранування від випромінювань γ -променів, які супроводжують складування та зберігання деяких радіоактивних відходів (зокрема, на АЕС України), а також обґрунтоване використання цих екрануючих модулів на основі гранульованих матеріалів. Враховуючи те, що ці матеріали є відносно низько затратними по собівартості, легко маніпулюємими у сенсі поглинальних параметрів, а також транспортування, заміни та евакуації у порівнянні з традиційно використовуваними монолітними конструкціями, тож технологія є актуальною та своєчасною. [1]

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Метою роботи є розробка концепції та моделей радіаційного екрану, створеного на основі мікро-механічної гранульованої конгломерації (гранульованого матеріалу). Параметризація та її основні захисні якісні параметри екрану. Порівняння нових запропонованих технологій із існуючими.

1.1 Огляд стану проблеми

Радіоактивні рідкі та тверді РАВ, які утворюються в процесі експлуатації на всіх АЕС як правило переробляються на наявних установах з метою подальшого їх безпечного зберігання в спеціальних сховищах твердих (СТРВ) та рідких (СРВ) радіоактивних відходів. Стан поводження та захисту з всіма радіоактивними відходами на АЕС України характеризується відсутністю завершеного технологічного циклу від переробки небезпечних відходів до отримання кінцевого продукту, придатного для довгочасового (100 – 200 років) подальшого безпечного зберігання або захоронення в спеціальних сховищах. Засоби зберігання різних радіоактивних відходів забезпечуються на кожній АЕС за допомогою спеціальних сховищ, призначених для різних радіоактивних відходів. Рідкі радіоактивні відходи зберігають нині у металевих герметичних ємкостях, виготовлених з антикорозійної сталі високої якості спецпризначення, та забезпечених автоматизованою системою визначення рівня РРВ, та сигналізацією на випадок протікання, разгерметизації та аварійних ситуацій. Для виключення аварійного витікання та проникнення так званих РРВ у навколишнє середовище та природу усі ці ємкості розміщені за планом у залізобетонних приміщеннях, облицьованих на висоту аварійного розливу ємністей товстими листами, виготовленими з високоякісної антикорозійної сталі спеціальної технології. [2]

Тверді РАВ зберігаються в місцях їх утворення, сортуються по категоріях (згідно с потужністю дози шкідливого гама-випромінювання) та транспортуються у СТРВ. На деяких сучасних АЕС України перед розміщенням на тимчасове зберігання радіоактивних речовин, здійснюється попередня обробка низькоактивних ТРВ за допомогою процесу підпресування (приклад Запорізької АЕС) та спалювання, як наприклад в Південно-Українській АЕС. СТРВ на майданчиках АЕС являють собою залізобетонні конструкції-моноліти, що складаються із окремих підрозділів призначених для розміщення ТРВ в залежності від категорії їх активності. Ці відсіки – підрозділи повинні бути обладнаними спеціальною системою пожежної сигналізації, автоматичною системою пожежогасіння та витяжною вентиляцією з очищенням внутрішнього повітря. Окремі відсіки-підрозділи СТРВ додатково обладнані системою виявлення, контролю та вилучення можливої вологи [1].

Згідно з офіційними домовленостями та правилами МАГАТЕ та інших природоохоронних організацій вони підлягають постійному жорсткому моніторингу. На сучасний момент сховища, наприклад, Запорізької та Південно-Української АЕС що стосуються зберігання та захисту від ТРВ заповнені лише на 70-75%. З ціллю збільшення безпеки захисту та об'єму сховища було прийняте важливе рішення побудувати ангарне сховище для зберігання контейнерів; тобто потрібно побудувати нове сховище, яке дасть нам змогу в подальшому збільшити ефективну загальну площу зберігання ТРВ більш ніж на 30-35%. Зараз на Рівненській АЕС введено в експлуатацію центрифугування та дві установки глибокого випарювання РРВ. Також в повній мірі широко проводиться загальні роботи по проектуванню сучасного комплексу для переробки твердих радіоактивних відходів. До обладнання цього сучасного комплексу наші вчені планують підключити установки та апаратуру для надійного, якісного та безпечного відлучення всіх типів відходів; установки та споруди для якісної фрагментації та сортування, установки суперпресування, системи автоматичного радіаційного контролю

під час відлучення, поводження та транспортування радіаційних шкідливих відходів. На Хмельницькій АЕС експлуатується обладнання глибокого випарювання, а також установка для спалювання різноманітних радіаційних відходів [1].

1.2 Безпека та сучасний стан поводження з відпрацьованим ядерним паливом на Україні

Треба дійсно запевнити, що відповідно до офіційної Угоди між Україною та Російською Федерацією про науково – технічне та економічне співробітництво в галузі атомної енергетики від 14.01.1993 року в конкретних зобов'язаннях ДП «НАЕК – «Енергоатом» відпрацьоване в Україні ядерне паливо від реакторів ВВЕР вивозиться на технологічне зберігання та переробку на спеціальні підприємства Російської Федерації (ФДУП «ВО «Маяк», ФДУП «ГХК»). Потім згідно Угоди в Україну мають бути повернені радіоактивні відходи, одержані після переробки ВЯП та цінні продукти їхньої переробки. Взагалі, згідно з підписаними державними Документами між країнами, повернення перероблених відходів в Україну здійснюється на умовах і в терміни, які визначатимуться конкретною документацією на повернення продуктів переробки ВЯП. Починаючи з 1993 року, відпрацьоване ядерне паливо (ВЯП) ВВЕР – 400 – ВП РАЕС віправляється на зберігання та перевірку на ФДУП «ВО «Маяк». На даний час в процесі погодження сторонами Договору (тобто Україною та РФ) технічні умови та процес оскловання ВАВ від переробки ВЯП реакторів ВВЕР – 400 Рівненської АЕС, що підлягають поверненню в Україну в певні терміни. Порядок паспортизації та Програма забезпечення необхідної якості під час проведення переробки ВЯП робиться згідно положень[2].

Будівництво сховища на майданчику комплексу «Вектор ДСП-«ЦППРВ» ДК УкрДО «Радон» для проміжного довготермінового (100 років) зберігання головних осклованих ВАВ від переробки ВЯП ВВЕР – 440,

передбачено завданням № 3 Загальнодержавної цільової екологічної програми поводження в радіоактивними відходами, затвердженою Законом України від 17.09.2008 року № 516-VI.

У 2012 році розроблено проект «Техніко – економічного обґрунтування будівництва сховища для проміжного зберігання осклованих ВАВ, що повертаються з РФ після переробки відпрацьованого ядерного палива українських АЕС», на який було отримано позитивний позитивний експертний звіт ДП «Укрдержбудекспертиза». Проведена комплексна державна будівельна експертиза показала, що сучасне технічне рішення в проекті, в цілому, відповідає чинним в Україні та Європі будівельним нормам та правилам проектування, а також всім вимогам з ядерної та радіаційної безпеки. [2]

Крім того, розроблено проектно – кошторисну документацію (стадія «Проект»), яка разом із звітом з аналізу безпеки пройшла експертизу в «Держатомрегулюванні України» і 14.09.2016 року направлена в філію Держбудекспертизи, після чого планується розпочати роботи за стадією «Робоча документація».

Будівництво сховища вестиметься в дві черги (передбачено два головних пускових комплекси об'ємом: перший – на 350 м³; другий – на 200 м³). При цьому проектуванні зазначено, що орієнтовний термін введення пускових комплексів сховища в експлуатацію згідно з графіком затверджено Генеральним директором «УкрДО «Радіо» на 2019 рік.

Відпрацьоване ядерне паливо від Хмельницької, Рівненської та Південно-Української АЕС з ВВЕР – 1000 (крім Запорізької АЕС) вивозиться на тимчасове зберігання с подальшою переробкою на ФДУП «Гірничо – хімічний комбінат», розташований в місті Красноярськ РФ. До даного часу переробка ВЯП ВВЕР – 1000 на ФДУП «Гірничо – хімічний комбінат» ще не здійснюється. Повернення продуктів переробки, в тому числі РАВ в Україну може розпочатись згідно умов лише в 2025 році [2].

Радіоактивні відходи від переробки ВЯП ВВЕР – 1000 мають направлятись в сховища для проміжного зберігання з наступним їх вивантаженням та похованням в глибоких природних геологічних та стабільних формаціях земної кулі.

На даний час такі сховища в інфраструктурі діючих підприємств з поводження з радіаційними відходами в Україні на жаль, повністю відсутні. Тепер проводиться узгодження між сторонами всіх технічних умов та методики розрахунку кількості та активності продуктів переробки ВТВЗ – ВВЕР – 1000 Українських АЕС, що повертатимуться з 2019 року на Україну. Всі проблеми походження з відпрацьованим паливом на дострокову перспективу має вирішувати створення найбільш сучасного високотехнологічного централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива, що розраховане на зберігання ВЯП на Південно – Українській, Рівненській та Хмельницькій АЕС. Всі ці документи підтвержені позитивним аналізом міжнародної комісії МАГАТЕ з питань поводження та зберігання ВЯП на діючих АЕС. Головним партнером в постачанні технологічного обладнання для поводження з відходами ядерного палива є «Холтек Інтернешнл». [4]

Виготовлення та доставка обладнання для забезпечення введення в експлуатацію ЦСВЯП поводитьсь продовж 2017 – 2018 років. До 2020 року планується завершення постачання всього обладнання в повному обсязі згідно домовленостей [2]. У рамках першого пускового комплексу планується постачання обладнання для чотирьох контейнерів з ВЯП на майданчику ЦСВЯП. Введення в експлуатацію цього обладнання заплановано впродовж 2019 року. З 2019 року по 2020 рік планується постачання ще 90 спеціальних контейнерів для зберігання ВЯП та іншого закупленого технологічного обладнання.

Таким чином, введення в експлуатацію ЦСВЯП дозволить нашій країні з 2019 року повністю відмовитися від вивезення ВЯП до РФ, що істотно покращить економічні показники роботи з ВЯП, а також підвищить

енергетичну безпеку та незалежність України та усуне ризики зупинки енергоблоків внаслідок заповнення басейнів, витрати зменшуються не менш ніж в 2,5 – 3,0 рази а також зменшуються всі транспортні витрати, що до перевезення та технологічного зберігання в сховищах РФ, та як внаслідок це дозволить знизити собівартість електроенергії для країни. За оцінками фахівців, витрати на будівництво та експлуатацію ЦСВЯП будуть майже в 4,5 рази менші ніж сукупні , які сьогодні несе Україна вивозячі ядерне паливо до РФ, а інвестиції, вкладені в будівництво ЦСВЯП окупляться за найскромнішими оцінками менш ніж за 4 роки експлуатації [2].

Зараз доторкнемося питання безпеки переробки відпрацьованого ядерного палива. Від рішення проблеми переробки ВЯП залежить подальша доля всієї атомної та взагалі енергетики країни. В сучасному світі існує два напрямки поводження з ВЯП одні країни поховують ВЯП в стабільні геологічні формації земної кулі. Інші країни пішли шляхом переробки ВЯП, розуміючи наскільки важливо вміти вилучати цінні компоненти з ВЯП та використовувати їх для подальшої господарської та наукової діяльності.

Переробка ВЯП здійснюється для вирішення таких проблем:

- Отримання урану та плутонію та вироблення нового ядерного палива;
- Отримання різноманітних ізотопів, що можуть бути використані в медицині, промисловості та науці та інш.;
- Вирішення екологічних проблем, пов'язаних з похованням РАВ.

В сучасному світі ми знаємо, що кількість ВЯП постійно збільшується і його регенерація є основним завданням радіологічної технології переробки ТВЕЛів. В процесі переробки в першу чергу проводиться процес видалення урану та плутонію та їх очистка від радіоактивних продуктів ділення, в тому числі від нейтронних отруючих речовин, які можуть блокувати розвиток ланцюгової реакції за умови подальшого використання регенованих речовин [3].

Технологія переробки ВЯП новим засобом вилучення всіх радіонуклідів дуже корисна. За оцінками, витрати на будівництво та

експлуатація ЦСВЯП будуть майже в 4,5 рази менш ніж сукупні витрати, які сьогодні несе Україна, транспортуючи ВЯП до РФ, а інвестиції в ЦСВЯП окупляться, за оцінками фахівців, менш ніж за чотири роки експлуатації сховища [2].

Зараз торкнемося питання безпеки переробки ВЯП. Від рішення проблеми переробки ВЯП залежить подальша доля всієї атомної та взагалі всієї енергетики нашої країни. Користуючись кошторисними прорахунками та іншими показниками, ми можемо затверджувати, що кількість корисних витрат, з точки зору практиків або наукових фахівців буде безперервно змінюватись. Процес репресінга ВЯП полягається також в вилученні урану, плутонію та фракції осколкових елементів в наступному співвідношенні (96% ^{235}U , ^{238}U , біля 1% - Pu, а також 2-3% радіоактивні осколки ділення). В одній тоні ВЯП на момент вилучення з реактору міститься: 950-980 кг урану, 5,5-9,6 кг плутонію, а також невелика кількість альфа-випромінювачів (нептуній, америцій, кюрій та інші), активність яких може досягати 26 тисяч Ки на 1 кг ВЯП. Саме ці комплекси ВЯП є найважливішими та найкориснішими для вилучення.

Декілька слів про технологічний процес в галузі переробки ВЯП. Він включає в себе механічну фрагментацію (подріблення) ТВЕЛів з метою розкриття паливного матеріалу, розчинення, очищення розчинників від баластних домішок, екстракційне виділення та очищення урану, плутонію та інших товарних радіонуклідів, виділення діоксину плутонію, діоксину нептунію та гексагідрата, переробку розчинників, які вміщують інші радіонукліди та їх подальше виділення. [5]

В основі технології виділення урану та плутонію є їх розділення та очистка від продуктів ділення, а також лежить процес екстракції урану та плутонію за допомогою домішки трибутилфосфату. Цей процес здійснюється на багатоступінчастих екстракторах повільної дії.

Переробка ВЯП пов'язана з формуванням невеликого об'єму твердих та газоподібних РАВ з активністю близько до 0,22 Кі/год та великою кількістю різних відходів середньої та низької активності [3].

1.3 Вертикальна міграція радіонуклідів у ґрунті

Досліджуючи вертикальну міграцію радіонуклідів на базі Чорнобильських шарово-географічних умов, був одержаний гарний аналітичний вираз для кривих вертикального розподілу питомої активності радіонуклідів α (Бк/г) у верхньому прошарку ґрунту (суперпозиція експоненти і гауссоїди):

$$\alpha(x, t) = \left(\frac{\alpha_1}{L}\right) e^{-\frac{x}{L}} + \frac{\alpha_2}{\beta\sqrt{Dt}} e^{-\frac{(x-v)^2}{4Dt}} \quad (1.1)$$

де x – глибина ґрунтового прошарку (г/см²), L – параметр глибини міграції (г/см²), D – коефіцієнт дифузії (г/см²), β – нормувальний безрозмірний коефіцієнт, α_1, α_2 – параметри, які мають зміст частки питомої активності, яка бере участь у кожному з двох міграційних механізмів, які описуються експоненціальним і гауссовим розподілом (Бк/см²). Перший додаток описує «повільну» міграцію фізико-хімічних форм радіонуклідів, які сильно зв'язані шаровими частками. Частки таких форм, як правило, збільшуються у ряді $<^{90} Sr <^{106} Ru <^{144} Ce <^{137} Cs$. Другий член описує швидку міграцію, у якій бере участь менша частка радіонуклідів.

Значний інтерес представляє часова динаміка у часі параметрів вертикальної міграції й у першу чергу глибини проникнення, що характеризує заглиблення основної частки радіонуклідів. Дані, на яких ми звертаємо увагу, свідчать, що це заглиблення відбувається по лінійному закону: $L(t) = p + q(t)$. При чому розміри p і q залежать від шарових

характеристик i змінюються в межах $0,14 \div 0,77$ г/см² для p і $0,22 \div 0,41$ і г/см² для q .

Очевидно, що для невеликих проміжків часу отримана авторами лінійна залежність дійсно має місце, але при роботі з моделями на тривалі терміни необхідно використовувати дані по експоненціальному заглибленню радіонуклідів у шар. Спрощена модель експоненціального заглиблення радіонуклідів у шаровій структурі подається при цьому у виді:

$$\alpha_i(x, t) = \alpha_{i0} \exp\left(-\frac{x}{L(t)}\right) \quad (1.2)$$

де x – глибина проникнення. Потужність експозиційної дози (ПЕД) з урахуванням заглиблення радіонуклідів у шар знаходиться по формулі:

$$P_{\gamma i} = k_L^{(1)} \varepsilon_{0i} \sigma_i \quad (1.3)$$

де k_L коефіцієнт ослаблення гамма – випромінювання i – го радіонукліда при експоненціальному заглибленні з параметром $L(t)$, ε_{0i} – конверсійний чинник для безкінечного тонкого плоского джерела ($L = 0$), σ_i – щільність забруднення (Кі/км²).

Показана залежність k від глибини міграції L , яка розрахована для ¹³⁷Cs і 4-х значень L (0,16; 1,6; 4,8; 16 г/см²) для яких у роботі приведені коефіцієнти конверсії $\varepsilon(L)$.

При розрахунках виявилось, що k_L слабо залежить від енергії E_γ і залежність від $k(L)$ (можлива похибка 5%), яка розрахована для цезію, може бути використана для розрахунку ПЕД від будь якого іншого чорнобильського радіонукліда. Тоді розрахунок ПЕД від складної суміші радіонуклідів може здійснюватися по формулі:

$$P_{\gamma} = \sum_i k_L^i \varepsilon_{0i} \sigma_i = \left(\sum_i \varepsilon_{0i} \sigma_i \right) k_L(L) \quad (1.4)$$

Дозове навантаження на населення при цьому є:

$$D_{\gamma}(t) \int_0^t P_{\gamma}(t) dt \quad (1.5)$$

Зробленні оцінки, та визначенні модельні співвідношення створюють основу для побудови більш структурованих і реалістичних моделей захисних споруд орієнтованих на можливі фактори ризику потрапляння шкідливих радіаційних домішок до екологічних систем.

1.4 Кінетичний опис гранульованих матеріалів

Один з можливих наукових підходів до теми кінетичного старіння захисних екранів може бути реалізований за допомогою гранульованих матеріалів. Такий підхід має опиратися на опис фізичних станів, які супроводжують маніпулювання гранульованими матеріалами.

Такі стани можливо визначити, наприклад за допомогою відомих математичних функцій розподілу. Відповідні рівняння для опису функцій станів для кінетичного старіння є подібними до рівнянь Больцмана у класичній кінетичній теорії. У випадку негустих розподілів частинок – гранул з напруженими взаємодіями, які описуються за допомогою сталого коефіцієнту напружених витрат енергії, можуть бути визначені досить строго та точно. Відомі з літератури також такі їх модифікації, в яких їх застосування не обмежується границею достатньої розрядженості. [6]

Кінетична теорія гранульованих матеріалів, таким чином, формується у термінах та рівняннях Больцмана (у модифікації Енського) для функції розподілу $f(\bar{r}, \bar{v}, t)$, яка завдає ймовірність знаходження частинки із швидкістю \bar{v} у точці \bar{r} , на момент часу t . У найпростішому випадку з

газоподібним випромінюванням, яке складається з однакових частинок сферичної форми з радіусом r , за умов відсутності тертя та сталого коефіцієнту непружних витрат e , кінетичне рівняння має наступний вигляд:

$$(\partial_t + (v_1 - \nabla))f(v_1, r_1, t) = I[f], \quad (1.6)$$

де $I[f]$ – є так званий інтеграл зіткнень

$$I = d^2 \int dv_2 \int dn_{12} \theta(-v_{12} \cdot n_{12}) |v_{12} \cdot n_{12}| \times [\chi f(v'_1, r_1, t) f(v'_2, r_1 - dn_{12}, t) - f(v_1, r_1, t) f(v_2, r_1 + dn_{12}, t)] \quad (1.7)$$

$\chi = \frac{1}{e^2}$, θ – це тета-функція Хевісайда швидкості частинок перед зіткненням $v_{1,2}$, та після зіткнення $v'_{1,2}$, задовольняють співвідношення

$$v'_{1,2} = v_{1,2} \pm \frac{1+e}{2e} [n_{12} (v_1 - v_2)] n_{12} \quad (1.8)$$

Рішення типу $(\partial_t + (v_1 - \nabla))f(v_1, r_1, t) = I[f]$ формуються на підставі, так званої, концепції «молекулярного хаосу», яка базується на припущенні про відсутність будь-яких кореляцій проміж частинками, які зіткаються.

Безумовно, що у випадках більш густих станів гранульованої матерії (так званих гранульованих рідин та кристалів), внаслідок кореляцій поміж швидкостями частинок, обумовлених дисипативними зіткненнями, а також ефектів виключеного об'єму, застосування рівнянь типу $(\partial_t + (v_1 - \nabla))f(v_1, r_1, t) = I[f]$, є обмеженим, або навіть зовсім неприпустимим [14].

Рівняння так званого гідродинамічного підходу, які можуть бути отримані за допомогою обрізання ієрархічної послідовності кінетичних рівнянь для моментів функцій розподілу отриманих на основі відповідних рівнянь Больцмана, модифікованих у наближенні Чепмена-Енського []. Така

процедура кінець кінцем приводить до формулювання послідовності рівнянь (ланцюжка), які визначають зміну моментів та флуктуацій кінетичної енергії (вони визначають температуру гранульованої речовини). Однак, на відміну від гідродинамики звичайних газів та рідин, як розділу механіки суцільних середовищ, застосування вищеописаної «гранульованої» гідродинаміки дехто вважає недостатньо обґрунтованим внаслідок відсутності механізмів розділення масштабів мікроскопічного та макроскопічного рухів (зокрема, кластеризації).

Рівняння «гідродинаміки» гранульованих середовищ можуть скажімо мати наступний вигляд:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -v\nabla - u \quad (1.9)$$

$$v \frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla \cdot \sigma + v g \quad (1.10)$$

$$v \frac{\partial T}{\partial t} = -\sigma \div \gamma - \nabla \cdot g - \varepsilon, \quad (1.11)$$

де v – це густина гранульованого середовища віднесена до густини матеріалу, з якого складаються гранули.

$\vec{U}(\vec{r})$ – це поле швидкості

Кінетична «температура» гранульованого стану:

$$T = \frac{\langle \vec{u}\vec{u} \rangle - \langle \vec{u} \rangle^2}{2} \quad (1.12)$$

Субстанціональна похідна:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \left(\vec{u} \vec{\nabla} \right) \quad (1.13)$$

\vec{g} - прискорення вільного падіння;

\vec{q} - вектор потоку енергії.

Тензор напруг:

$$\gamma_{\alpha\beta} = \frac{\partial}{\partial \alpha} u_{\beta} + \frac{\partial}{\partial \beta} u_{\alpha} \quad (1.14)$$

ε - коефіцієнт дисипації енергії.

Зовні, тобто структурно, рівняння подібні до відомих рівнянь Нав'є-Стокса за винятком останньої складової в рівнянні, яка виникає внаслідок урахування суто дисипативних процесів. [10]

Система рівнянь є незамкненою і має бути доповнена відповідними матеріальними співвідношеннями для тензора напруг σ , потоку енергії \vec{q} та коефіцієнта дисипації енергії ε , які можуть визначатися, скажімо, феноменологічно, або у певних наближеннях. Так, наприклад, у випадку розрідженої гранульованої речовини матеріальні співвідношення часто записують у лінійному наближенні:

$$\sigma_{\alpha\beta} = [p + (\mu - \lambda)Tr\gamma]\partial_{\alpha\beta} - \mu\gamma_{\alpha\beta} \quad (1.15)$$

$$q = -k\nabla T \quad (1.16)$$

Наприклад, у випадку двомірного гранульованого газу, який складається із твердих дисків та характеризується вельми слабкою дисипацією під час зіткнень проміж частинками, була запропонована процедура замкнення рівнянь за допомогою системи модельних матеріальних співвідношень, яка має наступний вигляд:

$$p = \frac{4vT}{\pi d^2} [1 + (1 + e)G(v)] \quad (1.17)$$

$$\mu = \frac{2T^{\frac{1}{2}}}{2\pi^{\frac{1}{2}}dG(v)} \left[1 + 2G(v) + \left(1 + \frac{8}{\pi}\right)G(v)^2 \right] \quad (1.18)$$

$$\lambda = \frac{8\nu GT^{\frac{1}{2}}}{\pi^{\frac{3}{2}} d} \quad (1.19)$$

$$k = \frac{2\nu T^{\frac{1}{2}}}{\pi^{\frac{1}{2}} d G(\nu)} \left[1 + 3G(\nu) + \left(\frac{9}{4} + \frac{4}{\pi} \right) G\nu^2 \right] \quad (1.20)$$

$$\varepsilon = \frac{16\nu G(\nu) T^{\frac{1}{2}}}{\pi^{\frac{3}{2}} d^3} (1 - e^2), \quad (1.21)$$

де $\mu, \lambda, k, \varepsilon$ і $G(\nu)$ – відповідно, ε зсувна та об'ємна в'язкості; коефіцієнти теплопровідності та непружних втрат, та $G(\nu)$ – значення радіальної функції розподілу в точці (ν).

Скажімо, для двовимірного аналогу відомого співвідношення Карнахана – Старлінга у випадку системи пружних сфер відповідна функція $G_{CS}(\nu)$ має вигляд

$$G_{CS}(\nu) = \frac{\nu \left(1 - \frac{7\nu}{16} \right)}{(1-\nu)^2} \quad (1.22)$$

Співвідношення (1.17) діє в межах значень густини середовища, що не перебільшують 0,7.

Для більших густин ефективніше використовується також модельний вираз для функції розподілу, який було розраховано за допомогою теорії вільного об'єму:

$$G_{FV} = \frac{1}{(1+e) \left[\left(\frac{\nu_c}{\nu} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right]} \quad (1.23)$$

де $\nu_c \approx 0,82$ – границя довільного щільного впакування.

Інколи використовується, так званий, глобальний вираз для $G_{\Gamma}(v)$, який описує кросовер проміж різними режимами структуроутворення у гранульованих системах:

$$G_L = G_{CS} + (1 + \exp(-(v - v_0)/m_0)^{-1})(G_{FV} - G_{CS}), \quad (1.24)$$

де параметри $v_0 \approx 0,7$ та $m_0 \approx 10^{-2}$ визначаються емпірично.

Також зауважимо, що будь які існуючі, на теперішній час, способи замкнень рівнянь гідродинамічного підходу не спроможні описати такі, наприклад, режими у поведженні гранульованих матеріалів, як формування ниткоподібних силових ланцюжків з передачею напруг примусово уздовж периметру ланцюжків, які утримують стабільність протягом існування потоків. Сюди також треба віднести і явище гістерезису у переходах гранульованої речовини від рідиноподібних до твердих станів.

Незважаючи на ці обставини гідродинамічний підхід залишається найбільш поширеним при вивченні колективної поведінки в потоках гранульованих матеріалів, особливо в інженерних дослідженнях, і визнається фізичною спільнотою. Так само, за допомогою суцільно-механічних підходів були обґрунтовані нестійкості у поведінці збурених гранульованих матеріалів у вигляді мікропотоків таких, як гранульований конвекційно-подібний рух, флотаційні кластери, продовжні вали, структуроутворення під дією вібрації та деякі інші. [12]

1.5 Загальні уявлення про поглинальні уявлення гранульованих матеріалів

Для захоронення радіоактивних відходів використовують інженерно розробленні захисні модулі в які завантажують контейнери з радіоактивними

відходами. Між стінками контейнера і модуля формуються явні пустоти, які послаблюють захист. Щоб уникнути цього прийнято заповнювати цей пустий простір. В якості заповнювача використовують цементуючі матеріали. Такий матеріал зазвичай роблять рідким і заливають у модуль для ліквідації пустот. З часом цементуючий матеріал отвердіває утворюючи моноліту формацію, яка посилює захист, але не являється ідеальною.

Отверділий цементний матеріал, який практично не містить пустот, є надійним захистом від залишкової радіації. Але їх використання важко назвати абсолютно раціональним. З часом, постійний контакт з радіоактивними речовинами призводить до накопичення в собі радіаційних дефектів. Асимтоматично дія радіації призводить до окрихчування монолітного захисного (цементного) матеріалу. За певних станів навколишнього середовища (наприклад: сейсмічної активності) можуть виникати пошкодження у вигляді тріщин чи інших дефектів.

Складність маніпулювання захисними екранами полягає у тому, що після затвердіння в захисний модуль не можна додати чи вийняти відпрацьовані матеріали. [11]

В даній роботі, опираючись на концепції та ідеї, які були сформовані в [4], пропонується використовувати в захисних модулях замість цементної заливки гранульовані матеріали. В якості прикладу таких матеріалів можна розглянути: пісок змішаний з бентонітом та гравій.

Для того, щоб якісно уявити собі ефект послаблення гамма-випромінення захисними спорудами у загальному сенсі скористаємося законами Бугера:

$$I = I_0 e^{-\mu L}, \quad (1.25)$$

де I — шар поглинання заданої товщини; I_0 — початкова інтенсивність падаючого пучка гамма-променів; μ — лінійний коефіцієнт послаблення; L — товщина шару поглинання.

Закон Бугера показує інтенсивність гамма-променів, які пройшли через шар поглинання певної, заданої товщини. За законом Бугера враховується початкова інтенсивність падаючого пучка гамма-променів, лінійний коефіцієнт послаблення та товщина шару поглинання.

Якщо в якості захисного матеріалу використовується бетон, то ми, в даному випадку, можемо його наближено розглядати як однорідне середовище, яке буде поглинати енергію пучків гамма-квантів. Таким чином для опису ефекту поглинання бетоном використовують звичайну форму запису закону Бугера.

У тому випадку, коли в якості захисного матеріалу буде використовуватися гранульований матеріал, закон Бугера не може допомогти у здійсненні оцінок поглинальної здібності такого матеріалу, апріорі якщо ввести пошарову структуру, кожний елемент якої має власні поглинаючі властивості, на цьому шляху закон Бугера може бути сформульований наступним чином:

$$I = I_0 e^{-\mu L}, \quad (1.26)$$

$$I' = I_0 e^{-\mu_1 d_1} \cdot e^{-\mu_2 d_2} \cdot e^{-\mu_3 d_3} \cdot \dots, \quad (1.27)$$

$$d, d_1, d_2, d_3 \quad (1.28)$$

де: I_0 — інтенсивність падаючого випромінювання;

d_i — товщина послідовних шарів;

μ_i — послідовність поглинаючих здібностей шарів.

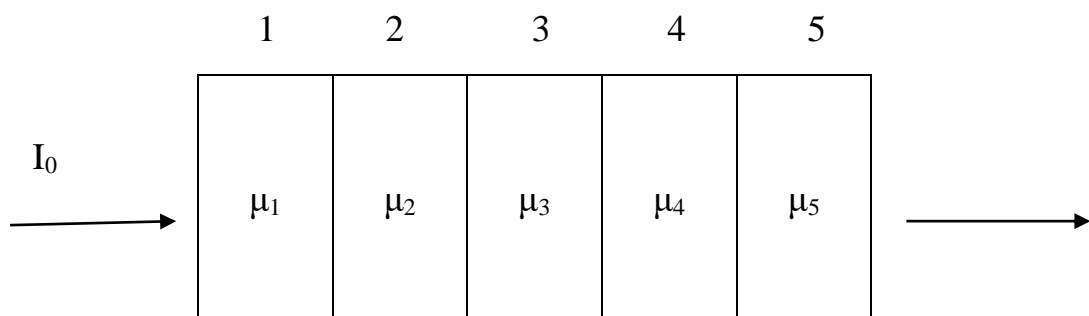


Рис. 1.1 Схематичне зображення шарово-періодичної поглинаючої структури

1.6 Природні та штучні гранульовані матеріали

Пісок, бентоніт та гравій добуваються в природі. Їхній природний радіаційний фон є незначним. Для України такі матеріали зручні тим, що на території нашої держави знаходяться великі родовища цих матеріалів. Ці родовища є легкодоступними. Використання гранульованого матеріалу в захисних модулях є, на мою думку, практичним рішенням. З ним легше працювати, вони мають меншу вартість. Більшість матеріалів такого типу готові до роботи без додаткових маніпуляцій з ними.

Пісок — це природний дрібнодисперсний матеріал. Він активно використовується людиною у будівництві. Практично всі типи піску відносяться до першого класу радіоактивності за ГОСТ 30108-94, тобто вони радіаційно-безпечні і дозволені для будівництва всіх типів. Гранична ефективна активність піску не перевищує 370 Бк/кг, що свідчить про його радіаційну безпеку. Світові запаси піску є достатньо великими. Ринкова ціна є відносно невеликою. Станом на 2018 рік комерційна вартість видобутку 1 тонни піску складає близько 150 гривень.

Бентоніт це природний глинистий матеріал. Має схильність до розбухання під впливом води. Після дії вологи перетворюється в в'язкий матеріал, який більше не пропускає воду. Бентоніт не токсичний. Широко застосовується людиною у будівництві. Не є радіоактивним. Вартість станом на 2017 рік становить 3000 грн/т.

Для більш ефективного захисту від радіації варто використовувати суміш піску і бентоніту. Така суміш є більш ефективною, ніж використання цих матеріалів окремо один від одного. Вміст бентоніту у суміші може коливатися від 20% до 85%, в залежності від потреби користувача. [11]

Гравій це природна крупнодисперсна гірська порода. Представляє собою обломки різних мінералів сформованих в результаті природного руйнування гірських порід. Практично весь гравій, що видобувається,

відносять до першого класу радіоактивності за ГОСТ 30108-94. Гранична ефективність активність більшості видів гравію складає приблизно 370 Бк/кг. Такі показники говорять про радіаційну безпеку такого матеріалу. Запаси гравію в природі є достатніми. Ціна станом на 2018 рік складає приблизно 220 грн/т.

Ще одним видом гранульованого матеріалу можна вважати будівельне сміття. Відходи будівництва складаються з матеріалів різного типу і походження. Такий тип відходів формується під час будівництва чи ремонту житлових, виробничих, промислових чи інших приміщень. Рівень радіоактивності в таких матеріалах мізерно малий, так як вони використовувалися у побуті людини. А витрати на такі матеріали зводяться до оплати подрібнення (якщо потрібне) та перевезення. До того ж таке використання будівельного сміття вирішить проблему його накопичення.

Як було написано вище, гранульовані матеріали є оптимальним рішенням для заміни цементного розчину в захисних модулях. При взаємодії опромінення з гранульованим матеріалом відбуваються досить специфічні реакції. Коли енергетична частинка взаємодіє з атомом в матеріалі, вона передає йому велику кількість кінетичної енергії (а). Ця частинка збурює велику кількість інших атомів у оточенні, створюючи каскад зіткнень, який перекривається зпереривається на границях (b). Після того, як каскад зіткнень розсіюється виникають точкові дефекти міжвузля і пустоти. Міжвузля швидко дифундують в гранульованій матриці (c). Водночас пустоти залишаються розміщеними в об'ємі, незмінним чином міжвузля затримуються на гранульованому матеріалі (d). Дефекти міжвузля можуть переходити з матеріалу до об'єму, заповнюючи пустоти. Цей процес протікає на часових масштабах, які набагато менші, ніж характерні часи дифузійних процесів (e). Система переходить до квазістаціонарного стану (f) і процес спрацювання модуля завершується (g). В ідеальному випадку система повертається до свого первісного стану (h). [11]

Для демонстрації дії опромінення з гранульованими матеріалами наведемо умовну скетч схему (Рис 1.2).

Безумовно, наведений вище сценарій відповідає лише примітивним уявленням про картину та характер взаємодії іонізуючого опромінення з гранульованою речовиною і не містить будь яких якісних та кількісних оцінок поглинальних можливостей гранульованих речовин. Про це піде мова в подальших викладеннях.

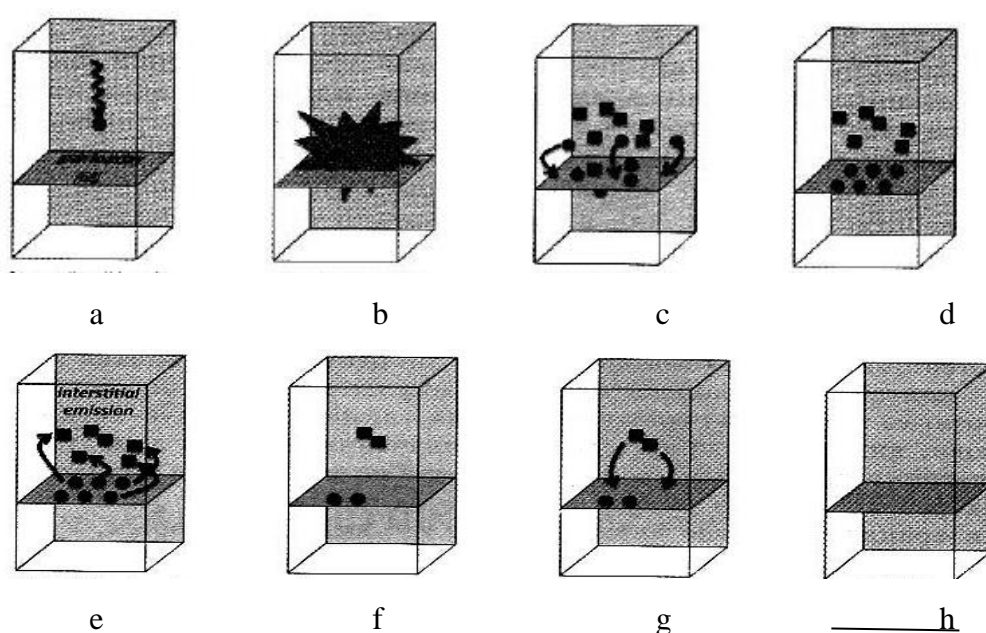


Рис 1.2. Скетч-схема для умовної демонстрації взаємодії опромінення з гранульованим шаром речовин.

2 ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГРАНУЛЬОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ

Дослідження структури та фізичних властивостей гранульованих матеріалів становлять дуже значну частину зусиль, як фізиків-теоретиків так і експериментаторів [3-6]. Серед причин, що привели до такого інтересу, зазвичай вказуються прояви гранульованими матеріалами незвичайних для

типових агрегатних станів речовини та властивостей. Як підтверджує практика, наприклад, такі явища, як скажімо, флюїдизація сухих гранульованих матеріалів під дією зовнішніх полів (осипання похилих насипів), насичення тиску у вертикальній ємкості, що містить ГМ (ефект арки), сегрегація (розподіл сухих сумішей, наприклад, ефект «Бразильського горіха») і деякі інші проявляються тільки в гранульованих матеріалах. Інтерес до вивчення властивостей гранульованих матеріалів також зумовлений важливістю розуміння їх фізичних властивостей для раціоналізації промислового виробництва і використання в технологіях захисних екранів, та можливістю створення на їх базі принципово нових наукомістких технологій. Гранульовані матеріали зараз широко представлені в докільці нашої країни та використовуються у будівництві (пудра, пісок, цемент, графіт, вугілля, зерно, сипкі порошки і суміші в будівельній та хімічній промисловості, металургії, ґрунт і навіть Всесвіт) – ось далеко не повний список такого роду об'єктів. [8]

За деякими оцінками, більш ніж 70% усього світового промислового виробництва повністю засноване або частково використовує та залежить від гранульованих матеріалів різної дисперсності: від мікропудр з розмірами гранул близько декількох мікрон до геологічних структур з розмірами окремих кам'яних монолітів в декілька метрів і більш. Нарешті Всесвіт, з деякими обмовками, також ми можемо віднести до одного прикладів розріджених гранульованих систем, наприклад, системи гранульованого газу та піску.

Багато унікальних властивостей та можливостей стосовно гранульованої матерії спостерігалися людством досить давно. В зв'язку з цим, досить згадати спостереження Ньютона та Фарадея нелінійних хвиль на поверхні піщаного шару, поміщеного в поле віброприскорень, та здійснене їми близько 160 років тому. Матеріали з якими ми стикаємося в нашому повсякденному житті, ми зазвичай класифікуємо з точки зору їх агрегатного стану, як гази, рідини та тверді тіла. А до якого з перерахованих станів

конденсованої матерії можна віднести гранульоване середовище? Це середовище може «текти» з похилої площини як лавина, або набувати потрібні форми посудини та контейнеру, куди ми їх поміщуємо (насипаємо) подібно до рідини. Кожна, окрема взята гранула, гранульованих матеріалів – скажімо пісок, безумовно – тверде тіло; проте конгломерація гранул вже показує властивості абсолютно нетипові та незвичайні для звичайних агрегатних станів (і для твердих тіл зокрема). [11]

2.1 Деякі специфічні фізичні властивості гранульованих матеріалів

Поведінка гранульованих матеріалів при маніпуляціях над ними дійсно виглядає цілком специфічно. Так, наприклад, якщо повільно насипати пісок на підкладку, то пагорб ростиме, зберігаючи конусоподібну форму, поки кут біля основи розчину не досягне деякого критичного значення. Після досягнення цього критичного параметра починається осипання верхніх шарів насипу, яке зовні нагадує лавину. Причому в лавиноподібному русі беруть участь лише частки, що належать шару деякої товщини, - поблизу поверхні конусоподібного насипу, тоді як інший масив залишається в стані спокою. Дуже багато матеріалів, які оточують нас в повсякденному житті, становлять основу різних галузей індустрії (будівельної, хімічної, фармакологічної, харчової) знаходяться, якраз, в гранульованому стані. Взагалі, серед споживаних і використовуваних людством матеріалів в переважній більшості, на тій або іншій стадії виробництва, обробки, або споживання, вони знаходяться, переважно, або в рідкому, або в гранульованому станах.

Тим більше дивно, що розуміння фізичної природи багатьох процесів, що відбуваються в гранульованих матеріалах, досі відсутнє або досягнуто частково. Такий стан справ привів навіть до того, що деякі виробництва, що використовують гранульовані матеріали, зустрілися з явищами, які можливо пояснити лише визнавши існування специфічних властивостей гранульованих матеріалів непружний колапс або сфера, що проявляються під

впливом зовнішніх обурень. Наприклад, ми можемо на власному досвіді легко переконатися, що змочений деякою кількістю води пісок, здатний утримувати форму конструкції (піщані замки, які ми із задоволенням зводимо на пляжі). Таж сама вода, але вже в більшій кількості, здатна розмити конструкції з сирого піску, позбавивши її стійкості. Відомо, що під час землетрусу мокрі ґрунти пливають подібно до рідин.

Таким чином, окрім перспектив ефективного подальшого застосування гранульованих матеріалів у зв'язку з їх унікальними властивостями, в технологіях, розвиток фундаментальної теорії, яка дозволила б зрозуміти і передбачити особливості їх поведінки, є дуже актуальним завданням сьогодення. [9]

Дуже важливим в поведінці гранульованих матеріалів є власне те, що обумовлює дисипативний характер системи цих матеріалів, і як наслідок незвичайну їх поведінку, що залежить від природи, форми, розмірів часток – гранул, а також від середовища, в яке вони поміщені. Всі властивості та поведінка гранульованих матеріалів часто нагадують, так би мовити, статистичні, хоча за своєю природною суттю, гранульований матеріал – механічна система, яка лише зовні показує колективну поведінку, ізоморфну, що вважається внаслідок своєї нелінійності. Саме цей «колективний характер» поведінки гранульованих матеріалів мають на увазі фахівці, коли вони використовують термін «статистична механіка» гранульованих матеріалів. «Колективна поведінка» гранульованих матеріалів – це невідмінна характеристика всіх їх властивостей та параметрів. [11]

За певних умов, та при певному розташуванні гранул, спостерігається явище спливання фрагменту гранульованого шару, яке використовується для захисту від шкідливих випромінювань. Це явище має абсолютно самостійну та унікальну фізичну природу, відмінну від своїх класичних прототипів. Відмінний шар гранул великої товщини на одноріно збуреній у вертикальному напрямку горизонтальній підкладинці покривається сіткою осередків (патернів), що мають специфічну симетрію наприклад –

гексагональну та гептоганальну, які залежать від умов збудження, товщини шару і типу гранул матеріалу. Вищеназване явище зовні нагадує нам, що спостерігається під час тектонічних явищ на поверхні ґрунтів, причому, «рідка» гранульована фаза матеріалу співіснує з «твердою». Описана властивість суміші фаз надає можливість в особливому захисті від постійно діючого випромінювання ізоморфно по відношенню до явища формування та конвективності цього випромінювання. Ця властивість якісно відрізняється від раніш існуючих засобів захисту від випромінювання від ВЯП на базі залізобетонних конструкцій, де явища формування захисту не відбуваються ізоморфно. В цих бетонних конструкціях під впливом вологи, температури та випромінювання зміни проходять нерівномірно, що призводить до певних деформацій та руйнування конструкцій. Явище ізоморфності зусиль та характеристик, що розповсюджуються в напрямках гранульованих матеріалів дає змогу покращити властивості та ефективність захисних екранів, споруджених для захисту від шкідливих гамма-випромінювань. Всі ці перелічені явища та приклади докладно свідчать про особливу цінність та відмінні властивості гранульованих матеріалів на відміну від раніше застосованих. Гранульовані матеріали дають нам змогу спроектувати та налагодити впорядковані структури в мезо- і в макро- масштабах, що є одним з важливіших та ключових питань в справі захисту від шкідливих радіовипромінювань.

3 ТЕОРЕТИЧНА МОДЕЛЬ ГРАНУЛЬОВАНОГО ЗАХИСНОГО ЕКРАНУ НА БАЗІ ПРИНЦИПІВ БАГАТОКАНАЛЬНОЇ ДИФУЗІЇ

3.1 Кінематична дифузія частинки

Тож торкнемося дуже важливого теоретичного питання стосовно явища аномальної дифузії, яка є відмінною особливістю нелінійного зростання середньоквадратичного відхилення як функції часу t . Воно вже нами знайдено в широкому спектрі та сенсі явищ всіх фізичних процесів. Але,

ми вважаємо, що є адекватний інструментарій опису дифузії. Це, на мою думку, рівняння, що знайдені в дрібних похідних. В дипломному проекті розглядаються теми, коли дифузія описується рівнянням: $(x^2(t)) \sim t^\gamma$. Цей випадок є характерним для більшості явищ аномальної дифузії, наприклад, коли ми маємо справу з динамікою та хаосом Гамільтонової системи. Але одним з найкращих методів опису дифузійних явищ є метод опису модельованих процесів. Наймовірніше, ми можемо вирішити дифузійні рівняння завдяки так званому Вінеровському процесу; густинність його підпорядковується класичним рівнянням дифузії.

Я за допомогою наданих моделей доводжу далі асимптотичне рівняння блукання для випадку субдифузій ($0 < \gamma < 1$), так і в випадку супердифузії, коли маємо справу з нерівністю ($1 < \gamma < 2$). [9]

В цій частині мого проекту я намагаюсь розглянути дифузійний процес аналогічно молекулярному газу. Вважаю, що потрібне розглянути одномірний випадок, а далі для багатомірного не буде проблем в опису. Припустимо, що значення моментів $(\dots, t_0, t_1, t_2, t_3, \dots, t_n, \dots)$ – це моменти зіткнень, між якими частина летить з дуже постійною швидкістю, а в деякий момент часу t_k , швидкість різко змінюється від значення v_k до значення швидкості v_{k+1} . А також інтервали (τ_1, τ_2, \dots) це інтервали між зіткненнями частинок, а:

$$\tau_k = t_k - t_{k-1} \quad (3.29)$$

Вважаємо, що початковий момент часу дорівнює $t=0$, при якому частинка газу знаходить на початку координат $(X(t)=0)$. При цьому самий початковий момент є момент між зіткненнями t_0 та t_1 . При цьому $t_0 < 0$ та $t_1 > 0$, мене цікавить насамперед вигогідність того, що координата $X(t)$ є для дифузійної частинки. Вважаємо, що детальна статистика $X(t)$ визначається властивостями вказаних інтервалів часу (τ_1, τ_2, \dots) , а також інтервалів швидкостей (v_1, v_2, \dots, v_n) між зіткненнями.

Досліджуємо асимптотичності для «макроскопічної», тобто загальної властивості та поведінку $X(t)$ на інтервалі часу $t \gg (\tau)$, де $(\tau) = (\tau_k)$ – значення середнього часу між зіткненнями, який грає роль мінімального масштабу для нашої питомої задачі.

Щоб спростити аналітику нашої задачі макроскопічного процесу дифузії часток, вважаємо, що процес змінення $X(t)$ та заміру цієї координати є макроскопічним, та заключається в наступних діях: за координату частки вважаємо координату x під час її останнього зіткнення в деякий визначений час t та в якості $X(t)$ я беру її значення $X(t_{пз})$. При цьому, ця координата, що віднесена до часу t може бути розрахована за допомогою рівнянь:

$$X_-(t) = X(t_N) = \begin{cases} v_1 t_1 & t_1 > t \\ v_1 t_1 + \sum_{k=2}^N v_k \tau_k & t_1 < t \end{cases} \quad (3.30)$$

тут $N=N(t)$ – кількість зіткнень в даному інтервалі часу $[0; t]$.

Індекс «-» я вважаю, згідно Вінеровському поясненню, в якому він пояснює вищу процедуру заміру координати частки, що дифузує. В подальшому розрахунку важливу роль буде відігравати зворотня к $n=N(t)$ – яка є функцією, залежною від зміни часу для n -стрибка частинки.

Вона має наступний вигляд:

$$t = T(n) = \begin{cases} 0 & n = 0 \\ t_1 & n = 1 \\ t_1 + \sum_{k=2}^N \tau_k & n \geq 2 \end{cases} \quad (3.31)$$

причому між функціями $n=N(t)$ та $t=T(n)$ є зв'язок, виражений формулою

$$n = N(t) \geq n \Leftrightarrow T(n) < t \quad (3.32)$$

цей зв'язок був введений аналітично.

3.1.1 Статистика дифундируючої частинки

Вважаю потрібне доторкнутися питання характеристичної функції описання процесу $X(t)$:

$$\theta_{-(u;t)} = \langle e^{iuX_{-}(t)} \rangle \quad (3.33)$$

вуглові скоби в цьому рівнянні означають статистичний осередок по ансамблю оцінки випадкових моментів зіткнення частин газу та їх швидкостей в інтервалі між послідовними зіткненнями. Запишемо середнє значення в найбільшій для читання відповідній формі запису. Для цього я пропоную скористатися виразом розкладання одиничної функції, що має вигляд:

$$X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \Pi_n(z) \quad (3.34)$$

де маємо:

$$\Pi_n(z) = X(z-n) - X(z-n-1), \quad X(z) = \begin{cases} 1, & z \geq 0 \\ 0, & z < 0 \end{cases} \quad (3.35)$$

За допомогою розкладу, середнє значення можемо переписати в вигляді наступної формули:

$$\theta_{-(u;t)} = \sum_{n=0}^{\infty} \langle e^{iuX(n)} \Pi_n(N(t)) \rangle \quad (3.36)$$

в цю формулу ввійшла ще одна функція цілосного числового аргументу:

$$X(n) = \begin{cases} v_1 t_1 & n = 1 \\ v_1 t_1 + \sum_{k=1}^n v_k t_k & n \geq 2 \end{cases} \quad (3.37)$$

Зараз проаналізуємо детальніше n -й доданок суми (3.36) за умови, що $n \geq 1$. Враховуючи (3.35) цей вираз можна записати в вигляді:

$$\begin{aligned} \langle e^{iuX(n)} \Pi_n(N(t)) \rangle \\ = \langle e^{iuX(n)} X(N(t) - n) \rangle - \langle e^{iuX(n)} X(N(t) - n - 1) \rangle \end{aligned} \quad (3.38)$$

Користуючись нерівністю перейдемо від (3.38) до співвідношення, що має вигляд:

$$\begin{aligned} \langle e^{iuX(n)} \Pi_n(N(t)) \rangle \\ = \langle e^{iuX(n)} X(t - T(n)) \rangle - \langle e^{iuX(n)} X(t - T(n + 1)) \rangle \end{aligned} \quad (3.39)$$

Додаємо вираз функції крізі трансформацію Лапласа до обох частин рівняння (3.36):

$$\hat{\theta}_{-(u;s)} = \int_0^{\infty} e^{-zt} \theta_{(u;t)} dt \quad (3.40)$$

Зважаючи увагу на формулу (3.39) ця функція записується нами в наступному вигляді:

$$\hat{\theta}_{-(u;s)} = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} [\langle e^{iuX(n)-T(n)} \rangle - \langle e^{iuX(n)-T(n+1)} \rangle] \quad (3.41)$$

3.1.2 Незалежні зіткнення

Далі розглянемо незалежні зіткнення. Нехай швидкості частинки між зіткненнями є статистично незалежними, та мають однаковий розподіл $\omega(v)$. Аналогічно зауважую, що є незалежні та випадкові інтервали часу $\{\tau_1, \tau_2, \dots\}$.

При чому, розповсюдження часу t_1 від початку спостереження до першого зіткнення дорівнює $f_+(\tau)$, розподіл інтервалів τ_k є однаковим, та дорівнює $f(\tau)$. Тоді середні значення в формулі (8) розщеплюються на множення середніх, а функція $\hat{\theta}_{-(u;s)}$ буде дорівнювати наступному виразу:

$$\hat{\theta}_{-(u;s)} = \frac{1}{s} \left[1 - \hat{f}_+(s) + \frac{g(u,s)[1 - \hat{f}(s)]}{1 - g(u,s)} \right] \quad (3.42)$$

Тут ми використовуємо наступні позначення:

$$\begin{aligned} g_+(u,s) &= \langle \hat{\omega}(ut_1)e^{-st_1} \rangle, \\ g(u,s) &= \langle \hat{\omega}(u\tau_1)e^{-st_1} \rangle, \\ g_+(u) &= g_+(u,0) = \langle \hat{\omega}(ut_1) \rangle \\ g(u) &= g(u,0) \langle \hat{\omega}(u\tau) \rangle, \end{aligned} \quad (3.43)$$

Вуглові скоби $\langle \rangle$ в виразі (3.42) та (3.43) позначають середнє за статистикою інтервалів t_1 та $\tau = \tau_k$, $\hat{\omega}(z)$ – це характеристична функція швидкості руху частинки. Цей вираз має наступний вигляд:

$$\hat{\omega}(z) = \int_0^{\infty} \omega(v) e^{ivz} dv \quad (3.44)$$

При цьому значення

$\hat{f}(s), \hat{f}_+(s)$ - це лаплас вирази розповсюдження $f(\tau)$ $f_+(\tau)$. Можу також подати приклад де:

$$\hat{f}(s) = g(0;s) = \langle e^{-z\tau} \rangle = \int_0^{\infty} f(\tau) e^{-z\tau} d\tau \quad (3.45)$$

В подальшій справі я вважаю за корисне повідомити, що буде застосовано мною друге співвідношення, що є родинним до виразу (3.42). Припустимо, що в (3.37) $\hat{f}_+ = \hat{f}$, а $g_+ = g$. Тоді отримуємо формулу в вигляді:

$$\hat{\theta}_{-(u;s)} = \frac{1}{s} \frac{1 - \hat{f}(s)}{1 - g(u,s)} \quad (3.46)$$

Ця формула відповідає ситуації, коли в якості початкового моменту часу беруть момент зіткнення частинки $t_0=0$.

3.1.3 Асимптотичні закони дифузії

В даному випадку, я обмежуюсь доки детальним аналізом статистичної послідовності для найпростішого наведених вище співвідношень, а саме вираз наданий в формулі (3.46). Тепер я вважаю зауважити, що поперше, вираз (3.46) узгоджується з умовою нормування:

$$\int_{-\infty}^{\infty} W(x;t) dx = 1 \quad (3.47)$$

В даному випадку функція $W(x;t)$ – це питомий вираз вірогідного розподілу координати дифузорованої частинки, що дорівнює зворотній трансформації Фур'є та Лапласа від функції $\hat{\theta}_{-(u;s)}$. Тут, я хочу всіляко зауважити Вам, що рівняння $g(0;s) = \hat{f}(s)$, та зауваємо, що вираз (3.46) має вигляд $\hat{\theta}(0; s)=1/s$ – це є Лаплас – вираз від одиниці. Це якраз і відповідає тому, що (3.46) рівняння співпадає з умовою нормування (3.47). Аналогічно Лаплас – вираз середнього квадрату дифузируючої частинки я отримаю завдяки відповідній формулі:

$$\hat{X}_-^2(s) = \int_{-\infty}^{\infty} \langle \hat{X}_-^2(t) \rangle e^{-zt} dt = - \left. \frac{\partial^2 \hat{\theta}(u; s)}{\partial u^2} \right|_{u=0} \quad (3.48)$$

Тепер я прораховую цей лаплас вираз вираз, підставивши в формулу (3.46) перші складові розподілу функції в ряд Тейлора в районі значень $u=0$, для більшої простоти буду вважати, що $v=0$, а в разі $(v)^2=\sigma^2$. Тоді в цьому випадку будемо мати вираз:

$$g(u, s) = \hat{f}(s) - \frac{\sigma^2}{2} u^2 \hat{f}''(s) + \dots \quad (3.49)$$

В цьому виразі $''$ означають похідні по аргументу s . Коли я підставляю (3.49) в (3.46), а потім (3.46) в (3.48), для Лаплас виразу середнього квадрату маємо формулу:

$$\hat{X}_-^2(s) = \frac{\sigma^2}{s\varphi(s)}, \quad \varphi(s) = \frac{1 - \hat{f}(s)}{\hat{f}''(s)} \quad (3.50)$$

Ми цікавимося всім виразом асимптотичного поведіння середнього квадрату $\langle X^2(t) \rangle$ за умови, що $t \rightarrow \infty$. Воно визначено асимптотичною формулою лаплас-виразу (3.50) за умови, що $s \rightarrow 0$. Тому я вважаю за необхідне дослідити вказану асимптотику до (3.50). Але розглянемо стандартну ситуацію, коли розповсюдження функції $f(\tau)$, наскільки швидко вона йде до нуля, за умови коли $t \rightarrow \infty$ а перші два моменти інтервалів зіткнення настільки обмежені, що

$$\langle \tau \rangle < \infty, \quad \langle \tau^2 \rangle < \infty \quad (3.51)$$

це є обмеження моментів зіткнення частинки. В цьому випадку для функції виразів є позначення та розклад, який описується наступною формулою (3.52):

$$\hat{f}(s) = 1 - \langle \tau \rangle s + \frac{1}{2} \langle \tau^2 \rangle s^2 + \dots \Rightarrow \hat{f}''(s) = \langle \tau^2 \rangle + \dots \quad (3.52)$$

Підставив вираз (3.53) в вираз (3.50) я одержую наступну формулу в вигляді:

$$\hat{X}_-^2(s) \sim \sigma^2 \frac{\langle \tau^2 \rangle}{\langle \tau \rangle} \frac{1}{s^2}, \quad s \rightarrow 0 \quad (3.53)$$

Тоді, використовуючи табличну формулу трансформації лапласа одержуємо наступний вигляд формули:

$$\frac{1}{s^\gamma} \Leftrightarrow \frac{f^{\gamma-1}}{\Gamma(\gamma)} \quad (3.54)$$

А з виразу (3.53) отримуємо стандартний лінійний закон дифузії частинки, що має такий вигляд:

$$\hat{X}_-^2(t) \sim Dt, \quad t \rightarrow \infty. \quad D = \sigma^2 \frac{\langle \tau^2 \rangle}{\langle \tau \rangle} \quad (3.55)$$

Аналогічно, зацікавлює нас аномальна супердифузія, яка виникає якщо порушується одна з обох нерівностей (3.51). Це виникає якщо розподіл інтервалів між зіткненнями має степенну асимптотику, яка має вигляд:

$$f(\tau) \sim k^\beta \tau^{-\beta-1}, \quad \tau \rightarrow \infty, \quad 0 < \beta \leq 2 \quad (3.56)$$

Тут має місце вираз за умови $0 < \beta < 1$ та $1 < \beta < 2$

$$\hat{f}(s) \sim 1 - k^\beta \frac{\Gamma(1-\beta)}{\beta} s^\beta, \quad s \rightarrow 0, \quad 0 < \beta < 1 \quad (3.57)$$

Також в цьому випадку справедлива формула другої похідної для функції $\hat{f}(\beta)$, яка дорівнює:

$$\hat{f}''(s) \sim k^\beta \Gamma(2 - \beta) s^{\beta-2}, \quad s \rightarrow 0, \quad 0 < \beta < 1 \quad (3.58)$$

Підставивши вираз (3.57), (3.58) в вираз (3.50) отримаємо:

$$\hat{X}_-^2(s) \sim \sigma^2 \beta(1 - \beta) \frac{1}{s^\beta}, \quad \tau \rightarrow \infty, \quad 0 < \beta \leq 1 \quad (3.59)$$

Знаходячи зворотню трансформацію Лапласа від цієї асимптотики за допомогою табличної формули (3.60) отримаємо:

$$X(t) \sim vt, \quad \langle X^2(t) \rangle \sim \tau^2 t^2 \quad (3.60)$$

Фізичний зміст цього результату полягає в тому, що в разі зіткнень, що є доволі рідкими, можна вважати, що частинка як би не відчуває зіткнень, двигается рівномірно.

Тепер розглянемо випадок №2 коли $1 < \beta < 2$. В цьому разі буде справедлива наступна асимптотика:

$$\hat{f}(s) \sim 1 - \langle \tau \rangle s + k^\beta \frac{\Gamma(2 - \beta)}{\beta(\beta - 1)} s^\beta \quad s \rightarrow 0, \quad 1 < \beta < 2 \quad (3.61)$$

Тоді ця асимптотика \hat{f}'' також описується за допомогою формули (3.59). Підставивши (3.61), (3.59) в вираз (3.50), одержуємо:

$$\hat{X}_-^2(s) \sim \sigma^2 \frac{k^\beta}{\langle \tau \rangle} \frac{\Gamma(2 - \beta)}{\Gamma(4 - \beta)} t^{3-\beta} \quad (3.62)$$

Таким чином, за умови $1 < \beta < 2$ середній квадрат координати частинки підпорядковується супердифузійному закону, який має вигляд:

$$\langle \hat{X}_-^2(t) \rangle \sim f^\gamma, \quad \gamma = 3 - \beta \quad (3.63)$$

Ле як слід тут чекати за умови, що $\beta = 1$, то він переходить в закон, що діє без зіткнень (3.59), а умови що $\beta = 2$, переходить в закон лінійної дифузії (3.55).

3.1.4 Дробове дифузійне рівняння

В цьому підрозділі я пропоную одержати так звані рівняння відносно параметрів $W(x; t)$. Для цього в вираз (3.26) підставимо розклади (3.39), (3.37), а також (3.26) або (3.29) для випадку $0 < \beta < 1$, або $1 < \beta < 2$ відповідно. В першому випадку одержуємо:

$$s^2 \hat{\theta}_{u,s} + Du^2 \hat{\theta}_{u,s} = s \quad (3.64)$$

$$D = \frac{\beta(1-\beta)}{2} \sigma^2, \quad 0 < \beta < 1 \quad (3.65)$$

Якщо далі ми будемо використовувати зворотні трансформації Фур'є та Лапласа, то ми дійдемо до рівняння, яке шукали в вигляді:

$$\frac{\partial^2 W(x; t)}{\partial t^2} = D \frac{\partial^2 W(x; t)}{\partial x^2} + \delta'(t) \delta(x) \quad (3.66)$$

Його рішення знаходиться як зворотня Фур'є - Лаплас трансформація. А зараз перейдемо до стандартного рішення необхідного рівняння:

$$\hat{\theta}_{-(u;s)} = \frac{s}{s^2 + Du^2} \Leftrightarrow W(x;t) = \frac{1}{2} [\delta(x - \sqrt{Dt}) + \delta(x + \sqrt{Dt})] \quad (3.67)$$

В другому випадку ($1 < \beta < 2$) рівняння (3.26) приводить нас к появи асимптотичного рівняння:

$$s^\gamma \hat{\theta}(u;s) + \frac{\sigma^2}{2\delta} u^2 \hat{\theta}(u;s) = s^{\gamma-1} \quad (3.68)$$

$$\delta = \frac{(r)}{k^{3-\gamma} \Gamma(\gamma-1)}, \quad \gamma = 3 - \beta \quad (3.69)$$

Звідти, з цього рівняння маємо вираз:

$$\frac{\partial^\gamma \tilde{W}(\tilde{x}; \tilde{t})}{\partial \tilde{t}^\gamma} = \frac{\sigma^2}{2\delta} \frac{\partial^2 \tilde{W}(\tilde{x}; \tilde{t})}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\tilde{t}^{-\gamma}}{\Gamma(1-\gamma)} x(\tilde{t}) \delta(\tilde{x}) \quad (3.70)$$

Це рівняння забезпечене підбором масштабів часу та координати $\tilde{t} = t/\delta^{1/\gamma}$, $\tilde{x} = x \cdot \sqrt{2/\sigma}$ на $\gamma = 3 - \beta$, тоді ми долучаємо його до наступного рівняння:

$$\frac{\partial^\gamma \tilde{W}(\tilde{x}; \tilde{t})}{\partial \tilde{t}^\gamma} = \frac{\partial^2 \tilde{W}(\tilde{x}; \tilde{t})}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\tilde{t}^{-\gamma}}{\Gamma(1-\gamma)} x(\tilde{t}) \delta(\tilde{x}) \quad (3.71)$$

Це рівняння ми будемо надалі називати дробно-дифузійним.

3.1.5 Процес дробного зносу

Перед тим, як вирішити отримане в останньому підрозділі рівняння дрібної дифузії, я також доводжу до відому, що мені цікаво буде продемонструвати властивості процесів дробного зносу. Але спочатку я хочу ввести поняття β – стійкого часу, $t(\beta)$ з стійким материнським розподілом $f_\beta(t)$, що має вигляд наданий нижче:

$$t(\varrho) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{[\varrho^n]} T_k^{(\frac{1}{n})} \quad (3.72)$$

В цьому випадку маємо, що $T_k^{(\frac{1}{n})}$ - безлімітно діляться на не негативні випадкові величини, лаплас-вирази густинності ймовірності яких дорівнюють $\hat{f}_n^{(\frac{1}{n})}(s)$, де $f(s) = \exp[-s^\beta]$ - це материнський лаплас - вираз за умови, що $(0 < \beta < 1)$. В силу того, що стійкість $f_\beta(t)$, густинність вирогідності випадкової функції $t(\varrho)$ дорівнює:

$$f_\beta(t; \varrho) = \frac{1}{\varrho^{1/\beta}} f_\beta\left(\frac{t}{\varrho^{1/\beta}}\right) \quad (3.73)$$

Розглянемо тепер функцію $\varrho(t)$, що є зворотною до функції $t(\varrho)$. Нехай відома густинність ймовірностей $f(t; \varrho)$ значень функції $t(\varrho)$, а нам необхідно визначити густинність ймовірностей функції $Q(\varrho; t)$, значень зворотної функції $\varrho(t)$. Знайдемо тепер зв'язок між ними, спираючись на еквівалентність нерівностей:

$$t(\varrho) < t \Leftrightarrow \varrho(t) \geq \varrho \quad (3.74)$$

На мові ймовірностей теж можна записати в вигляді:

$$F(t; \varrho) = P(t(\varrho) < t) = P(\varrho(t) \geq \varrho) = \int_{\varrho}^{\infty} Q(\varrho'; t) d\varrho' \quad (3.75)$$

З цього рівняння знаходимо співвідношення, що нам необхідно, яке існує між густинностями ймовірностей випадкових процесів $t(q)$ та $q(t)$. Це співвідношення має вигляд:

$$Q(q; t) = -\frac{\partial F(t; q)}{\partial q} = -\frac{\partial}{\partial q} \int_{-\infty}^t f(t'; q) dt' \quad (3.76)$$

Підставивши розподіл (3.73) в вираз (3.76), знайдемо густинність ймовірності зворотної функції $q(t)$. Вона дорівнює:

$$Q_{\beta}(q; t) = \frac{1}{t^{\beta}} Q_{\beta}\left(\frac{q}{t^{\beta}}\right) \quad (3.77)$$

$$Q_{\beta}(q) = \frac{1}{\beta q^{1+1/\beta}} f_{\beta}\left(\frac{1}{q^{1/\beta}}\right) \quad (3.78)$$

Із визначення вірогідності зворотної функції $Q_{\beta}(q)$ та з формули для Лапласа – виразу розподіла $f_{\beta}(t)$ виходить, що:

$$\exp(-qs^{\beta}) = \beta \int_0^{\infty} e^{-st} \frac{q}{t^{\beta+1}} Q_{\beta}\left(\frac{q}{t^{\beta}}\right) dt \quad (3.79)$$

Нехай величина R має розподіл $Q_{\beta}(q)$. Знайдемо моменти R , помноживши (3.79) на q^{v-1} та проінтегруємо його по q від 0 до ∞ . У підсумку одержуємо вираз:

$$\frac{\Gamma(v)}{s^{v\beta}} = \beta (R^v) \int_0^{\infty} e^{-st} t^{v\beta-1} dt = \beta (R^v) \frac{\Gamma(v\beta)}{s^{v\beta}} \quad (3.80)$$

Звідти у підсумку маємо наступний вираз:

$$(R^v) = \int_0^{\infty} q^v Q_{\beta}(q) dq = \frac{\Gamma(v)}{\beta\Gamma(v\beta)} = \frac{\Gamma(v+1)}{\Gamma(v\beta+1)} \quad (3.81)$$

Таким чином, розподіл лаплас – образу для виразу $Q_{\beta}(\tau)$ в ряд Тейлора має наступний вигляд:

$$\widehat{Q}_{\beta}(s) = \langle e^{-sR} \rangle = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\Gamma(n\beta+1)} s^n = E_{\beta}(-s) \quad (3.82)$$

В цю формулу ввійшла так званна функція Мітгаг-Леффльора, в якій $E_{\beta}(z)$ дорівнює по визначенню:

$$E_{\beta}(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{\Gamma(n\beta+1)} \quad (3.83)$$

Також можна показати, що функція $E_{\beta}(-(t/\tau)^{\beta})$ є рішенням рівняння що дано далі:

$$\frac{d^{\beta}\Phi(t)}{dt^{\beta}} + \tau^{-\beta}\Phi(t) = \frac{t^{-\beta}}{\Gamma(1-\beta)}x(t) \quad 0 < \beta < 1 \quad (3.84)$$

Це рівняння є дрібним узагальненням звичайного похідного рівняння:

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = -\frac{1}{\tau}\Phi(t) \quad (3.85)$$

рішенням якого є експонента $e^{-1/\tau} = E_1\left(-\frac{t}{\tau}\right)$. Користуючись виразами (3.78) та (3.82) ми побачимо, що лаплас-вираз по q розподілу для $Q(q; t)$ дорівнює:

$$Q(q; t) = \langle e^{-\gamma q(t)} \rangle = E_{\beta}(-\gamma t^{\beta}) \quad (3.86)$$

Зараз розглянемо випадковий процес, що описується виразом $X(t) = q(t)$ з густиною вирогідностей:

$$W(x; t) = \frac{1}{t^{\beta}} Q_{\beta} \left(\frac{q}{t^{\beta}} \right) \quad (3.87)$$

Назвемо цей вираз (3.87) дрібним зносом. Його характеристична функція, згідно з (3.86) дорівнює:

$$\theta(u; t) = \langle e^{i u q(t)} \rangle = E_{\beta}(i u t^{\beta}) \quad (3.88)$$

Далі можемо сказати, що з (3.83) випливає, що вона підпорядковується рівнянню:

$$\frac{\partial^{\beta} \theta}{\partial t^{\beta}} = i u \theta + \frac{t^{-\beta}}{\Gamma(1 - \beta)} x(t) \quad (3.89)$$

За допомогою процесу дрібного зносу можливо знайти густина вирогідностей дрібно дифузійного процесу $X(t) = V(q(t))$. Тут $V(q)$ – є вінеровський процес ($\langle V^2(q) \rangle = 2q$). Вочевидь, можна сказати, що питома густина вирогідностей підпорядковується рівнянню дрібної дифузії (3.66), характеристична функція підпорядковується рівнянню:

$$\frac{d^{\beta} \theta}{dt^{\beta}} + u^2 \theta = \frac{t^{-\beta}}{\Gamma(1 - \beta)} x(t) \quad (3.90)$$

Вирішим його, опираючись на характеристичну функцію дрібного зносу. Розіб'ємо його на парну та непарну складові:

$$\theta = \theta_{even} + \theta_{odd} \quad (3.91)$$

та підставимо його (3.82). Це дає нам два рівняння, що мають вигляд:

$$\frac{d^\beta \theta_{even}}{dt^\beta} = iu\theta_{odd} + \frac{t^{-\beta}}{\Gamma(1-\beta)} x(t), \quad \frac{d^\beta \theta_{odd}}{dt^\beta} = iu\theta_{even} \quad (3.92)$$

Подіавши на перше з них похідною порядку $\beta(t)$ та виключивши непарну компоненту, перейдемо до замкнутого рівняння відносно $\theta_{even}(u; t)$

$$W_{even}(x; t) = \frac{1}{2} [W(x; t) + W(-x; t)] = \frac{1}{2} W(|x|; t) \quad (3.93)$$

Воно підпорядковується рівнянню, яке ми надаємо нижче:

$$\frac{\partial^{2\beta} W_{even}}{\partial t^{2\beta}} = \frac{\partial^2 W_{even}}{\partial x^2} + \frac{t^{-2\beta}}{\Gamma(1-2\beta)} x(t) \delta(x) \quad (3.94)$$

яке зводиться до (3.71) заміною β на $\gamma/2$. Таким чином, одержуємо, що згідно з (3.86), (3.83) рішення рівняння дрібної дифузії (3.71) можна записати в належному вигляді:

$$W(x; t) = \frac{1}{2t^{\frac{\gamma}{2}}} Q_{\frac{\gamma}{2}} \left(\frac{|x|}{t^{\frac{\gamma}{2}}} \right) \quad (3.95)$$

Розподіл $Q_{\gamma/2}(z)$ я можу знайти за допомогою зворотної трансформації Фур'є, зробленої від $E_{\gamma/2}(iu)$, за умови, що $1 < \gamma < 2$.

Завдяки властивостям функції Міттаг – Леффлера, треба зробити висновок, що:

$$Q_{\gamma/2}(z) = \frac{2}{\pi\gamma} \operatorname{Re} \int_0^{\infty} \exp(ixz + x^{2/\gamma} e^{-i\pi/\gamma}) dx \quad (3.96)$$

Останні два рівняння задають нам густинність вирогідностей супердифузії. Для простоти образу надаю графічні зображення функції $Q_{\beta}(z)$, за умови різних β , (дивись мал.)

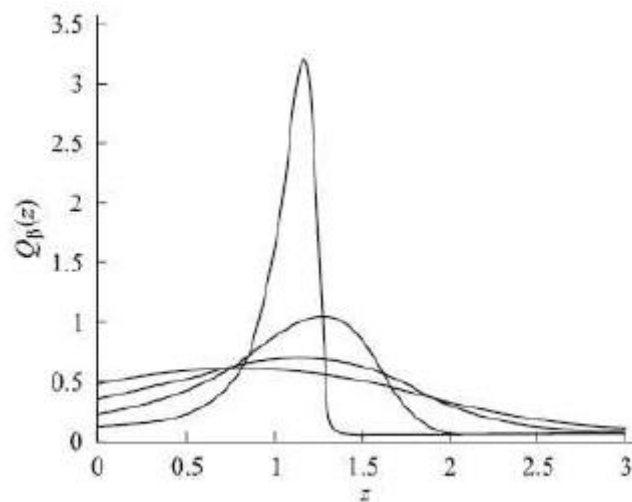


Рис. 3.1— Графіки розподілу $Q_{\beta}(z)$ для різних значень $\beta=0,65 - 0,95$.

Вони експоненціально спадають зі зростом z , що забезпечує обмеженість моментів (R^{ν}).

3.2 Дифузія в паралельних каналах

Розглянемо модель, в якій механізм дифузії домішок реалізуватиметься в пористих шарових системах, в яких прошарки речовин розташовані всюди паралельно напрямку головного струму. Такий сусперій може бути притаманий середовищам з постійно неоднорідною структурою, які пронизують всю товщу зразка (великі прошарки чужорідних фаз, великі

пори, границі зернини та дислокації), якщо всі вони являють собою взаємопереплетені та взаємозалежні сітки каналів по яким можливо здійснювати незалежну міграцію гамма-радіонуклідів. То цей же механізм часто використовується в методі так званої термодесорбційній спектроскопії, коли визволення адсорбенту з потенціалу поверхні – різних типів потенційних ям, розташованих на поверхні відбувається одночасно. Механізм звичайної паралельної дифузії зустрічається також в режимі газопроникності мембран змінної товщини для гранульованих матеріалів. Якщо реалізується випадок, коли частинка (нуклід) зонду цього матеріалу, що потрапив випадковим образом в один з транспортних каналів, не здатний надалі перейти в інший канал, то кінетика встановлення потоку газу крізь мембрану може бути представлена сумою елементарних потоків J_i по кожному з каналів за формулою:

$$J = J_1 + J_2 + \dots = \sum_{i=1}^n J_i \quad (3.97)$$

або

$$S \frac{D_f \Gamma}{L} = \sum_{i=1}^n \frac{D_i \Gamma_i}{l_i} S_i \quad (3.98)$$

де S площа поверхні i -тої трубки струму на поверхні мембрани (повна поверхня мембрани $S = \sum s_i$). Зазвичай вважають, що $l_i = L$, тоді:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n D_i \Gamma_i \Phi_i \quad (3.99)$$

де n – кількість дифузійних каналів. Розчинність $\Gamma = \sum \Gamma_i \Phi_i$.

Нестаціонарні режими дифузії задовільняють системи рівнянь:

$$\begin{aligned}\frac{\partial C_1}{\partial t} &= D_1 \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2} \\ \frac{\partial C_2}{\partial t} &= D_2 \frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2} \\ \frac{\partial C_n}{\partial t} &= D_n \frac{\partial^2 C_n}{\partial x^2}\end{aligned}\quad (3.100)$$

при відповідних початкових та граничних умовах для многоканальної моделі середовища.

Можна ввести характерний параметр — час запізнення при дифузному характері проникнення в багатоканальних системах для прошарків:

$$\frac{1}{\tau_{\text{зап}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_{\text{зап},i}} \quad (3.101)$$

Наприклад, для двохшарового модуля ця величина має вигляд:

$$\tau_{\text{зап}} = \frac{L^2}{6(D_1 \Phi_1 + D_2 \Phi_2)} \quad (3.102)$$

Загальна формула, що надана для визначення параметру τ процесу паралельної дифузії має вигляд:

$$\tau_{\text{зап}} = \frac{L^2}{6(D_1 \Phi_1 + D_2 \Phi_2)} \quad (3.103)$$

$$\frac{1}{\tau_{\text{зап}}} = \frac{1}{\tau_{\text{зап}1}} + \frac{1}{\tau_{\text{зап}2}} = \frac{6D_1\Phi_1}{L_1} + \frac{6D_2\Phi_2}{L_2} \quad (3.104)$$

тоді:

$$\frac{1}{\tau_{\text{зап}}} = \frac{6D_1\Phi_1 \cdot L_2 + 6D_2\Phi_2 \cdot L_1}{L_1 \cdot L_2} \quad (3.105)$$

а також:

$$\tau_{\text{зап.пар.}} = \frac{L_1 \cdot L_2}{6(D_1\Phi_1 \cdot L_2 + D_2\Phi_2 \cdot L_1)} \quad (3.106)$$

Можна показати, що цей параметр для 2-х шарового модуля гранульованих матеріалів, у випадку послідовної морфології має вигляд:

$$\tau_{\text{зап.посл.}} = \frac{\frac{L_1^2}{D_1} \cdot \left(\frac{l_1}{6\Gamma_1 D_1} + \frac{l_2}{2\Gamma_2 D_2} \right) + \frac{L_2^2}{D_2} \cdot \left(\frac{l_1}{2\Gamma_1 D_1} + \frac{l_2}{6\Gamma_2 D_2} \right)}{\frac{l_1}{\Gamma_1 D_1} + \frac{l_2}{\Gamma_2 D_2}} \quad (3.107)$$

Загальна формула за якою визначається час запізнення при комбінації паралельної та послідовної морфології каналів:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{зап.1}} + \tau_{\text{зап.2}} &= \\ &= \frac{L_1 \cdot L_2}{6(D_1\Phi_1 \cdot L_2 + D_2\Phi_2 \cdot L_1)} + \\ &+ \frac{\frac{L_1^2}{D_1} \cdot \left(\frac{l_1}{6\Gamma_1 D_1} + \frac{l_2}{2\Gamma_2 D_2} \right) + \frac{L_2^2}{D_2} \cdot \left(\frac{l_1}{2\Gamma_1 D_1} + \frac{l_2}{6\Gamma_2 D_2} \right)}{\frac{l_1}{\Gamma_1 D_1} + \frac{l_2}{\Gamma_2 D_2}} \end{aligned} \quad (3.108)$$

3.3 Зауваження щодо дифузії при послідовній морфології каналів

Механізм послідовної дифузії зонда реалізуватиметься в шарових системах гранульованих матеріалів, в яких шари розташовані

перпендикулярно напрямку головного потоку радіонуклідів. Процеси розчинення та дифузії в багат шарових системах подібного типу при припущенні, що розчинення зонда в кожному шарі, наприклад, у випадку газів можуть бути описані за допомогою класичного закону Генрі в якому відношення концентрацій на межі шарів дорівнює відношенню констант розчиненостей зонда в речовинах суміжних шарів, а на вхідний і вихідний поверхнях шаруватого зразка, виконуються граничні умови 1-го роду. За вищезазначених припущеннях для послідовної дифузії, «прохід» радіонуклідів через багат шарову систему каналів гранульованих матеріалів, що складається з m - різних шарів, може бути записаний у вигляді:

$$\frac{1}{J_{ст}} = \sum_{n=1}^m \frac{1}{J_i} = \sum_{i=1}^m \frac{l_i}{D_i \Gamma_i} \quad (3.109)$$

де Γ_i та D_i є коефіцієнт Генрі та коефіцієнт дифузії в кожному шару, а L_i – товщина конкретного шару. Товщина збірної мембрани дорівнює:

$$L = \sum_{i=1}^m l_i \quad (3.110)$$

Константа проникнення крізь шари мембрани $P = J_{ст}/p_0$ пов'язана парціальними константами проникнення шарів співвідношенням:

$$\frac{L}{P} = \frac{l_1}{P_1} + \frac{l_2}{P_2} + \dots \quad (3.111)$$

або:

$$\frac{1}{P} = \frac{\sum_{n=1}^m \frac{l_i}{P_i}}{L} \quad (3.112)$$

а константа розчинності дорівнює:

$$\Gamma = \frac{\sum_{n=1}^m l_i \Gamma_i}{\sum_{n=1}^m l_i} \quad (3.113)$$

Для опису процесу нестационарного проникнення зонда гранульованих матеріалів крізь шарову мембрану необхідно вирішити рівняння:

$$D_i \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} = \frac{\partial C_i}{\partial t} \quad (3.114)$$

За звичайних крайових умов ми можемо сказати, що для класичного методу газопроникнення можливо описати завдяки приданих формул $C_i(x, t=0)=0$ при $l_i-1 \leq x \leq L_m$:

$$\begin{aligned} D_i \frac{\partial C_i(t)}{\partial x} &= D_{i+1} \frac{\partial C_{i+1}(t)}{\partial x}, x = L_i \\ C_1(x=0, t) - \Gamma_i P_0; \quad C_m(x=L, t) - 0; \\ \frac{C_i(t)}{C_{i+1}(t)} &= \frac{\Gamma_i}{\Gamma_i}, \quad x = l_i \end{aligned} \quad (3.115)$$

$$\begin{aligned} \tau_{\text{зап}} = & \frac{\frac{l_1^2}{D_1} \left(\frac{l_1}{6\Gamma_1 D_1} + \frac{l_2}{2\Gamma_2 D_2} + \frac{l_3}{2\Gamma_3 D_3} \right) + \frac{l_2^2}{D_2} \left(\frac{l_1}{2\Gamma_1 D_1} + \frac{l_2}{6\Gamma_2 D_2} + \frac{l_3}{2\Gamma_3 D_3} \right)}{\frac{l_1}{\Gamma_1 D_1} + \frac{l_1}{\Gamma_2 D_2} + \frac{l_1}{\Gamma_3 D_3}} \\ & + \frac{\frac{l_3^2}{D_3} \left(\frac{l_1}{2\Gamma_1 D_1} + \frac{l_2}{2\Gamma_2 D_2} + \frac{l_3}{6\Gamma_3 D_3} \right) + \left(\frac{\Gamma_1 l_1 l_2 l_3}{D_1 D_3 \Gamma_1 \Gamma_3} \right)}{\frac{l_1}{\Gamma_1 D_1} + \frac{l_1}{\Gamma_2 D_2} + \frac{l_1}{\Gamma_3 D_3}} \end{aligned} \quad (3.116)$$

Час запізнення не залежить від зміна шарів 1 та 3, тобто від напрямку дифузійного струму радіонуклідів, але істотно змінюється за умови зміни

шарів 1 та 2 або 2 та 3. Величина стаціонарного струму зонда направлена крізь мембрану та константи проникнення не залежать від переміщення шарів. Ефективний коефіцієнт дифузії, наприклад, для складової трьох шарової мембрани дорівнює:

$$D_{\text{эф}} = \frac{L^2}{6\tau_{\text{зап}}} \quad (3.117)$$

У випадку прошарової системи константа розчинності зонда, що визначена за формулою $\Gamma = P/D_{\text{эф}}$ не буде співпадати однозначно зі значенням константи розчинності, що одержана нами завдяки численим рівноважним сорбційним експериментам. Ця обставина дозволяє нам однозначно відокремлювати прошарове середовище від однорідного середовища. Завдяки цьому час запізнення для двох шарової мембрани складає:

$$\tau_{\text{зап}} = \frac{\frac{l_1^2}{D_1} \left(\frac{l_1}{6\Gamma_1 D_1} + \frac{l_2}{2\Gamma_2 D_2} \right) + \frac{l_2^2}{D_2} \left(\frac{l_1}{2\Gamma_1 D_1} + \frac{l_2}{6\Gamma_2 D_2} \right)}{\frac{l_1}{\Gamma_1 D_1} + \frac{l_2}{\Gamma_2 D_2}} \quad (3.118)$$

Із симетрії цієї формули випливає, що величина часу запізнювання не залежить від напрямку потоку. Для тонкого шару 1, нанесеного на підкладку 2, $\tau_{\text{зап}}$ прагне до $\tau_{\text{зап}2}$ при досить великих коефіцієнтах дифузії і розчинності зонда в шарі 1. Якщо ж розчинність зонда в шарі 1 мала, то $\tau_{\text{зап}}$ двошарової мембрани суттєво зростає порівняно з $\tau_{\text{зап}2}$, прагнучи до значення $3\tau_{\text{зап}2}\Gamma_2\Gamma_1 \rightarrow 0$ або $D_2D\Gamma_1 \rightarrow 0$.

У разі багатошарового композиту гранульованих матеріалів типу 121212... значення для часу запізнювання приймає вигляд:

$$\tau_{\text{зап.н}} = \frac{\xi_1 D_2 + K_1 \xi_2 D_2}{6D_1 D_2} \left(\xi_1 + \frac{\xi_2}{K_1} \right) l^2 \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$+ \frac{l^2}{n^2} \left[\frac{\xi_1^3 D_2^2 + K_1 \xi_2^3 D_1^2 + 3\xi_1 \xi_2 D_1 D_2 (K_1 \xi_1 + \xi_2)}{6D_1 D_2 (\zeta_1 D_2 + K_1 \zeta_2 D_1)} \right] \quad (3.119)$$

де n - число пар шарів типу 1, 2. Якщо $n=1$, то:

$$\tau_{\text{зап.}n} = \frac{l^2}{6} \left[\frac{\xi_1^3 D_2^2 + K_1 \xi_2^3 D_1^2 + 3\xi_1 \xi_2 D_1 D_2 (K_1 \xi_1 + \xi_2)}{D_1 D_2 (\xi_1 D_2 + K_1 \xi_2 D_1)} \right] \quad (3.120)$$

Таким чином:

$$\tau_{\text{зап}} = \tau_{L\infty} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) + \tau_{\text{зап.}n} \frac{1}{n^2} \quad (3.121)$$

Подальший аналіз може включати в собі конструювання дифузійних мембран гранульованих матеріалів складного типу з декоруванням шарів та досягненням таким чином якісних дросельних властивостей і т.і.

Загальна формула за якою визначається час запізнення при комбінації паралельної та послідовної морфології каналів:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{зап.}1} + \tau_{\text{зап.}2} &= \\ &= \frac{L_1 \cdot L_2}{6(D_1 \Phi_1 \cdot L_2 + D_2 \Phi_2 \cdot L_1)} + \\ &+ \frac{\frac{L_1^2}{D_1} \cdot \left(\frac{l_1}{6\Gamma_1 D_1} + \frac{l_2}{2\Gamma_2 D_2} \right) + \frac{L_2^2}{D_2} \cdot \left(\frac{l_1}{2\Gamma_1 D_1} + \frac{l_2}{6\Gamma_2 D_2} \right)}{\frac{l_1}{\Gamma_1 D_1} + \frac{l_2}{\Gamma_2 D_2}} \end{aligned} \quad (3.122)$$

Вона враховує хаотичність морфології прохідних каналів, яка властива всім типам гранульованих матриць.

3.4 Дифузія в однорідному середовищі, що містить окремі великі включення простої форми

Коротко торкнися проблеми дифузії зонда в однорідному середовищі гранульованих матеріалів, що містить окремі включення простої форми. У цьому випадку виникає завдання обтікання дифузійним струмом окремої перешкоди. Як приклад розглянемо круглий нескінченний циліндр радіусу r_0 з речовини з коефіцієнтом дифузії D_1 і константою розчинності Γ_2 , що знаходиться в нескінченному однорідному середовищі з коефіцієнтом дифузії D_2 і константою розчинності Γ_1 , крізь яку проходить стаціонарний дифузійний струм з щільністю струму (вісь циліндра спрямована перпендикулярно струму). Рішення будемо шукати в циліндричній системі координат, записавши рівняння Лапласа у вигляді частинних похідних:

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = D_2 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_2}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 C_2}{\partial \varphi^2} \right\} = 0 \quad (3.123)$$

Використовуємо умови на границі включення $\frac{\partial C_1}{\partial r} = \frac{\partial C_2}{\partial r}$ та $C_1 = C_2$ та умови для середовища, що вміщує: $C = (jr/D) \cos \varphi = C_{\text{н}}$ (у нескінченності поле однорідне) та $C(0) \neq \infty$, де $C_{\text{н}}$ - концентрація зонда в "ідеальному" середовищі з коефіцієнтом дифузії D_1 . Розподіл концентрації зонда в просторі поза циліндром:

$$C_1 = C_{\text{н}}(x) + C_1^*(r) \quad (3.124)$$

в середині циліндру $C_2 = C_{\text{н}}(x) + C_2^*(r)$, де C_1^* та C_2^* визначають спотворювальну дію включення. В методі проникнення $C_{\text{н}}(x) = C_0(1-x/L)$.

Збурення концентрації матеріалів поза циліндром має вигляд:

$$C_1^* = -\frac{j}{D_1} r \cos \varphi \left(1 - \frac{r_0^2 K D_2 - D_1}{r^2 D_1 + K D_2} \right) = C_{\text{н}} \left(1 - \frac{\nu - 1 r_0^2}{\nu + 1 r^2} \right) \quad (3.125)$$

де $\nu = \frac{P_2}{P_1} = K D_2 / D_1$

Збурення концентрації матеріала всередині циліндра:

$$C_1^* = -\frac{j}{D_1} \frac{K D_1}{D_1 + D_2 K} r \cos \varphi = C_{\text{н}} \frac{2K}{1 + \nu} \quad (3.126)$$

Якщо включення однорідної фази непроникно для зонда тоді:

$$C_1 = C_{\text{н}} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) \quad (3.127)$$

З останнього виразу я можу зробити висновок, що циліндричне включення позначається (з точністю до 5%) на розподіл концентрації матеріалів зонда до відстані в 2,5 рази яка перевищує його діаметр. Аналогічно для включення у формі кулі рівняння:

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = D_2 \left\{ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C_2}{\partial r} \right) \right\} \quad (3.128)$$

з граничними умовами на включенні:

$$C_2 = K C_1 /_{r=r_0, \varphi=\text{const}}, D_1 \left(\frac{dC_1}{dr} \right)_{r=r_0} = D_2 \left(\frac{dC_2}{dr} \right)_{r=r_0} \quad (3.129)$$

відповідні формули для збурення концентрації:

$$C_1^*(r, \varphi) = -\frac{j}{D_1} r \cos \varphi \left(1 - \frac{r_0^3}{r^3} \frac{KD_2 - D_1}{2D_1 + KD_2} \right) \quad (3.130)$$

$$C_1^*(r, \varphi) = -\frac{j}{D_1} r \cos \varphi \left(1 - \frac{KD_2 - D_1}{2D_1 + KD_2} \right) = C_n \frac{3K}{2 + \nu} = C_1 K_\alpha \quad (3.131)$$

де α – параметр форми (в даному розрахунку –с для кулі)

В режимі газопроникності стаціонарний розподіл концентрації зонда по товщині мембрани, яка містить окреме включення концентенцій у формі кулі, центр якої розташовується на глибині h від вхідних поверхонь мембрани, визначається наступними формулами:

$$C_1^* = C_0 \left[1 - \frac{x}{L} + \frac{1}{L} \left(\frac{r_0^3}{r^3} \frac{KD_2 - D_1}{2D_1 + KD_2} \right) (x - h) \right] \quad (3.132)$$

$$C_1^* = C_0 \left[1 - \frac{x}{L} + \frac{1}{L} \left(\frac{KD_2 - D_1}{2D_1 + KD_2} \right) (x - h) \right] \quad (3.133)$$

$$r = (x^2 + y^2 + z^2 + h^2 - 2hx)^{1/2} \quad (3.134)$$

Зауважую, що такого роду вирази та формули використовуються мною при обробці результатів нестационарної томографії.

3.5 Дифузія в макронеоднорідних дисперсійних середовищах

Модель дифузії в дисперсійних середовищах враховує вплив геометричної форми і розмірів дефектів на процеси масопереносу. Під дефектами в широкому сенсі звичайно розуміють будь які неоднорідності структури матеріалу: газові бульбашки, включення сторонніх фаз, наповнювачі, каверни і тріщини. Розглянемо дифузію в розведеній дисперсії

включень простої форми (куля, сфероїд, циліндр. і т. і.), розміри яких більше довжини дифузійної хвилі, але все ж істотно менше товщини зразка. Будемо припускати, що на кордоні дефекту існує локальна рівновага, а дифузія зонда сферично симетрична.

Система рівнянь для дифузії в пластині товщиною L , що містить включення сферичної форми радіуса r_0 , має вигляд:

$$\begin{aligned}\frac{\partial C_1}{\partial t} &= D_2 \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2} - 4\pi r_0^2 n_2 D_2 \left(\frac{\partial C_2}{\partial r} \right)_{r=r_0} \\ \frac{\partial C_2}{\partial t} &= D_2 \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial C_2}{\partial r} \right)_{r=r_0} \\ C_2 &= K C_1\end{aligned}\quad (3.135)$$

де C_1, C_2 – концентрації зонду в матриці і у включенні;

D_1, D_2 - коефіцієнти дифузії в дисперсійному середовищі і в дисперсній фазі відповідно;

K - локальна розчинність у включенні (відношення константи розчинності зонда в "дефектній" області до константи розчинності в матриці);

n_2 – густина включень.

Кінетика газопроникності описується формулою:

$$I(t) = \frac{C_0 D_1 S}{L} \left\{ 1 + \frac{4\pi^2}{K\beta} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m(-1)^m \exp(-\Omega \xi_{mm}^2 \tau)}{\left[\frac{\Omega}{K\beta} + 1 + ct g^2 \xi_{mm} - \left(1 - \frac{m^2 \pi^2}{K\beta} \right) \frac{1}{\xi_{mm}^2} \right]} \right\} \quad (3.136)$$

де ξ_{mn} – визначається рішенням рівняння:

$$\Omega \xi_{mm}^2 + K\beta(1 - \xi_{mm} ct g \xi_{mm}) = n^2 m^2 \quad (3.137)$$

$$\Omega = \frac{D_2 L^2}{D_1 r_0^2} \quad (3.138)$$

тут:

$$\beta = \frac{\delta D_2 L^2}{D_1 r_0} = \varepsilon \Omega \quad (3.139)$$

$$\delta = 4\pi r_0^2 n_2 \quad (3.140)$$

$\varepsilon = \frac{V_{\text{окл}}}{V_{\text{обр}}}$ - об'ємна доля включень

$$V_{\text{обр}} = SL \quad (3.141)$$

$$\tau = \frac{D_1 t}{L^2} \quad (3.142)$$

Вищенаведений вираз має громіздкий вигляд: він містить подвійну суму, причому для визначення деяких декрементів згасання необхідно вирішити трансцендентне рівняння першого порядку. Тому, скажімо, для обробки результатів експериментів зручніше скористатися методом параметричних моментів. Наприклад, у випадку газопроникності плоскої мембрани:

$$\mu_1 = \frac{T}{6} \quad (3.143)$$

$$\mu_2 = \frac{7T^2}{180} + \frac{TT_2 K^*}{9(1 + K^*)} \quad (3.144)$$

$$\mu_3 = \frac{31T^3}{2520} + \frac{7T^2 T_2 K^*}{90(1 + K^*)} + \frac{2TT_2^2 K^*}{15(1 + K^*)} \quad (3.145)$$

Якщо включення являють собою циліндри радіуса r_0 з непроникними торцями, то:

$$\mu_1 = \frac{T}{6} \quad (3.146)$$

$$\mu_2 = \frac{7T^2}{180} + \frac{TT_2K^*}{24(1+K^*)} \quad (3.147)$$

$$\mu_3 = \frac{31T^3}{2520} + \frac{7T^2T_2K^*}{240(1+K^*)} + \frac{2TT_2^2K^*}{48(1+K^*)} \quad (3.148)$$

Знаючи товщину матеріалу мембрани і вимірявши три перших моменти від кінетичної кривої проникності шарів, можна знайти параметри D_1 , K^* та T_2 . Для роздільного визначення радіусу кривизни включення r_0 та коефіцієнта дифузії в ньому D_2 якусь з цих величин необхідно отримати в окремих повсякденних експериментах. Відзначимо, що в методі проникності значення першого моменту не залежить не від розмірів, не від геометрії включення, а від щільності матеріалу. У формулі для другого моменту геометричний фактор формально з'являється, але грає роль деякої константи K в розглянутій раніше моделі дифузії зі зворотним захопленням. Тому по перших двох моментах розглянуту таку модель неможливо відрізнити від моделі дифузії з тимчасовим утриманням. Лише вищі моменти завжди залежать від форми включення. Для розрахунку D_1 та D_2 за методом моментів доводиться використовувати вищі моменти, обтяжені великими статистичними помилками, або проводити зміни на зразках різної товщини.

Аналогічний спосіб застосуємо і для опису газопроникності матеріалу мембран що містять включення різної форми. Наприклад, якщо включення являють собою пластини товщиною L (циліндри або призми з непроникною бічною поверхнею), то отримаємо:

$$\mu_1 = \frac{T}{6} \quad (3.149)$$

$$\mu_2 = \frac{7T^2}{180} + \frac{TT_2K^*}{9(1+K^*)} \quad (3.150)$$

$$\mu_3 = \frac{31T^3}{2520} + \frac{7T^2T_2K^*}{90(1+K^*)} + \frac{2TT_2^2K^*}{15(1+K^*)} \quad (3.151)$$

Якщо включення являють собою циліндри радіуса r_0 з непроникними торцями, то:

$$\mu_1 = \frac{T}{6} \quad (3.152)$$

$$\mu_2 = \frac{7T^2}{180} + \frac{TT_2K^*}{24(1+K^*)} \quad (3.153)$$

$$\mu_3 = \frac{31T^3}{2520} + \frac{7T^2T_2K^*}{240(1+K^*)} + \frac{2TT_2^2K^*}{48(1+K^*)} \quad (3.154)$$

Як випливає з наведених виразів, геометрична форма включень грає роль, починаючи з другого моменту.

4 РОЗСІЯННЯ ХВИЛЬ В БАГАТОЦЕНТРОВІЙ СИСТЕМІ ЗАХИСНОГО ЕКРАНУ

Розсіяння гамма-хвиль та інших типів шкідливого випромінювання є важливою складовою та напрямком досліджень в області теоретичної фізики, а особливо зв'язаних з моделюванням захисних екранів, здібних захищати від гамма-випромінювання по багато центровій складній мішені. Протягом тривалого часу аналітичні розв'язки задачі існували лише для високо-симетричного ізолюваного розсіювача [37]. Насправді природні об'єкти такі як, наприклад гранульовані матеріали мають складну агреговану структуру і відповідно складну морфологію. Два основних компоненти багатократного

розсіяння – взаємодія і інтерференція мають відмінні риси, в порівнянні з розсіянням на одному типі частинок. Застосування теореми складання для векторних сферичних хвильових функцій (ВСФ) зробило можливим повернутися до проблеми багатократного розсіяння електро-магнітних випромінювань на структурованих об'єктах більш обґрунтовано [38-44].

4.1 Аналіз розсіяння плоскої хвилі за допомогою координат зсуву

Сукупність сфер є непоглинаючим однорідним середовищем що характеризується діелектричною константою ϵ_0 і проникливістю μ_0 . Для моделі розсіяння гамма випромінювань важливо знати що сукупність сфер є цим непоглинаючим однорідним середовищем. Поля розсіяння кожною окремою часткою визначаються у відповідних сферичних системах координат. В умовно вибраній системі координат L , декартівські координати початку, нехай дорівнюють $(X^j \ Y^j \ Z^j)$, де $j=1, 2, \dots, L$. Вектор падаючої плоскої хвилі гамма випромінювання завжди спрямований у додатну область Z . Розв'язок задачі розсіяння та опис моделі цього розсіяння на багатьох сферах в рамках наближення Мі дається суперпозицією мультиполів падаючої плоскої хвилі і має вигляд розкладу (в термінах ВСФ) в кожній L сферичної системи координат, де $(z$ – бігуча плоска хвиля з лінійно поляризованим кутом β_r характеризується хвильовим вектором $K = K\hat{e}_z$ (4/1/),

де $K = 2\pi/\lambda$ – є хвильовим числом, λ – довжина падаючої хвилі в навколишньому середовищі і \hat{e} разом з $\hat{e}_x \ \hat{e}_y$ є ортонормовані одиничні вектори в декартівській системі координат. У головній j_0 th системі координат, вектор падаючого електричного поля випромінювання є:

$$E_{inc} = E_0 \exp(ikz) \quad (4.155)$$

де $E_0 = E_0(\hat{e}_x \cos \beta_\rho + \hat{e}_y \sin \beta_\rho)$ та $i = \sqrt{-1}$.

Гармонійна складова $\exp(-i\omega t)$, де ω - кутова частота опущення.

У j_0 th системі координат падаюче електромагнітне поле розсіяння може бути виражено у ВСФ у наступному вигляді і маємо:

$$E_{inc} = - \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n iE_{mn} [p_{mn} N_{mn}^{(1)}(\rho, \theta, \varphi)] \quad (4.156)$$

$$H_{inc} = \frac{k}{\omega\mu_0} \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n E_{mn} [q_{mn} N_{mn}^{(1)}(\rho, \theta, \varphi)] \quad (4.157)$$

де $\rho=kr$ та

$$E_{mn} = E_o i^n \left[\frac{(2n+1)(n-m)!}{n(n+1)(n+m)!} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.158)$$

Необхідно визначити, що в цьому випадку нормативний множник, знайдений у (4.146), відрізняється від раніше використаного, який складає функцію:

$$E_{mn} = E_o i^n (2n+1) \frac{(n-m)!}{(n-m)!} \quad (4.159)$$

Векторні сферичні хвильові функції, що мають певне значення для моделювання розсіяння на захисних екранах є $M_{mn}^{(1)}$ та $N_{mn}^{(1)}$ мають також специфічну складну форму вираження:

$$M_{mn}^{(1)}(\rho, \theta, \varphi) = [\hat{e}_\theta i\pi_{mn}(\cos\theta) - \hat{e}_{mn}(\cos\theta)] j_n(\rho) \exp(im\varphi) \quad (4.160)$$

$$N_{mn}^{(1)}(\rho, \theta, \varphi) =$$

$$= \left\{ \hat{e}_r n(n+1) P_n^m(\cos \theta) \frac{j_n(\rho)}{\rho} + [\hat{e}_\theta \tau_{mn}(\cos \theta) + \hat{e}_\varphi i \pi_{mn}(\cos \theta)] \frac{\Psi_n'(\rho)}{\rho} \right\} \exp(im\varphi) \quad (4.161)$$

де $\hat{e}_r, \hat{e}_\theta, \hat{e}_\varphi$ базисні ортонормовані, тобто одиничні вектори напрямку в сферичній системі координат,

j_n - сферична функція Бесселя першого роду,

P_n^m - об'єднана функція Лежандра першого роду,

$\Psi_n'(\rho) = \rho j_n(\rho)$ - одна з функцій Рікати-Бесселя, позначення похідної, від якої має вигляд:

$$\pi_{mn}(\cos \theta) = \frac{m}{\sin \theta} P_n^m(\cos \theta) \quad (4.162)$$

$$\tau_{mn}(\cos \theta) = \frac{d}{d\theta} P_n^m(\cos \theta), \quad (4.163)$$

Визначення, яке по статистиці застосовується для модуля узагальненої класичної функції Лежандра P_n^m утримується з точністю до множника $(-1)^m$. Зрівнянь ((4.155) – (4.158)), (4.161) та (4.163) та ортогональності, впливає що математичне розкладання важливих числових коефіцієнтів у (4.157) приймає вигляд:

$$p_{mn} = \frac{i \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \exp(ikz) E_0 \cdot N_{mn}^{(1)}(\rho, \theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}{E_{mn} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |N_{mn}^{(1)}(\rho, \theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi} \quad (4.164)$$

$$q_{mn} = \frac{i \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \exp(ikz) E_0 \cdot M_{mn}^{(1)}(\rho, \theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}{E_{mn} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |M_{mn}^{(1)}(\rho, \theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi} \quad (4.165)$$

Тоді для моделювання розсіяння гамма промінів в електромагнітному полі з вищеназваного отримуємо вираз:

$$p_{mn} = q_{mn} = 0, |m| \neq 1 \quad (4.166)$$

$$p_{1n} = q_{1n} = \frac{\sqrt{2n+1}}{2} \exp(-i\beta_p) \quad (4.167)$$

$$p_{-1n} = -q_{-1} = -\frac{\sqrt{2n+1}}{2} \exp(-i\beta_p) \quad (4.168)$$

Зауважимо, що останні результати відрізняються від тих, що зазвичай фігурують у відповідних роботах з розсіяння гамма випромінювання, за рахунок зміни нормованого множника E_{mn} електромагнітного поля. У будь-якій j th системі координат, розміщеної на j th сфері, розклад падаючого поля має такий же вигляд, що й співвідношення (4.156):

$$E_{inc}^j = E_{nc} = - \sum_{n=0}^{N^j} \sum_{m=-n}^n i E_{mn} \left[p_{mn}^j N_{mn}^{(1)}(p^j, \theta^j, \varphi^j) + q_{mn}^j M_{mn}^{(1)}(p^j, \theta^j, \varphi^j) \right] \quad (4.169)$$

$$H_{inc}^j = H_{nc} = - \frac{k}{\omega \mu_0} \sum_{n=0}^{N^j} \sum_{m=-n}^n E_{mn} \left[q_{mn}^j N_{mn}^{(1)}(p^j, \theta^j, \varphi^j) + p_{mn}^j M_{mn}^{(1)}(p^j, \theta^j, \varphi^j) \right] \quad (4.170)$$

де $p^j = kr^j$. Враховуючи, що $z^j = z - Z^j$ падаюче електричне поле можна також записати як $E_{inc}^j = E_{nc} = E_0 \exp(ikZ^j) \exp(ikz^j)$. Фазова стала $\exp(ikZ^j)$ прив'язана до початку j th системи координат. Це забезпечує те, що записане в j th системі координат падаюче поле не змінюється по фазі відносно центру, який завжди співпадає з початком основної системи координат. Коефіцієнти розкладання падаючого поля в (4.169) задовольняють співвідношенням:

$$p_{mn}^j = (ikZ^j)p_{mn}, \quad q_{mn}^j = (ikZ^j)q_{mn} \quad (4.171)$$

Співвідношення (4.168) відрізняються від загальних коефіцієнтів розкладу спрощеним виглядом в разі фазової сталої і дозволяють здійснити параметризацію відповідних параметрів.

4.2 Розсіяння на окремих сферах

Подібно падаючому полю, окремо розсіяні поля кожної компоненти сферично симетричного розсіяння можуть бути розкладені у відповідних (сферичних) системах координат, а саме вигляд:

$$E_{sca}^l = \sum_{n=1}^{N^l} \sum_{m=-n}^n iE_{mn} \left[a_{mn}^l E_{mn}^{(3)}(p^l, \theta^l, \varphi^l) + b_{mn}^l M_{mn}^{(3)}(p^l, \theta^l, \varphi^l) \right] \quad (4.172)$$

$$H_{sca}^l = \frac{k}{\omega\mu_0} \sum_{n=1}^{N^l} \sum_{m=-n}^n E_{mn} \left[b_{mn}^l E_{mn}^{(3)}(p^l, \theta^l, \varphi^l) + a_{mn}^l M_{mn}^{(3)}(p^l, \theta^l, \varphi^l) \right] \quad (4.173)$$

де $M_{mn}^{(3)}$ та $N_{mn}^{(3)}$ відрізняються від M_{mn}^1 та $N_{mn}^{(1)}$ тільки похідною функції $-h_n^{(1)}$, яка є сферичною функцією Ханкеля першого роду (і замінює j_n сферичну функцію Бесселя першого роду). Врахування граничних умов для коефіцієнтів парціального розсіяння ($a_{mn}^{(l)}$, $b_{mn}^{(l)}$ для кожної компоненти включає в себе спеціальні схеми пошуку повного розв'язку задачі про багатократне розсіяння. Врахування стандартних електромагнітних граничних умов накладених на сферичній поверхні відокремленої кулі дає:

$$a_{mn}^l = a_n^{-l} P_{mn}^l \quad b_{mn}^l = b_n^{-l} QP_{mn}^l \quad (4.174)$$

де a_n^l та b_n^l коефіцієнти розсіяння Мі на окремій l th сфері, які мають вигляд:

$$P_{mn}^l = p_{mn}^l - \sum_{j \neq l} \sum_{v=1}^{N^j} \sum_{\mu=-v}^v (A_{mn\mu v}^{jl} a_{\mu v}^j + B_{mn\mu v}^{jl} b_{\mu v}^j) \quad (4.175)$$

$$Q_{mn}^l = q_{mn}^l - \sum_{j \neq l} \sum_{v=1}^{N^j} \sum_{\mu=-v}^v (B_{mn\mu v}^{jl} a_{\mu v}^j + A_{mn\mu v}^{jl} b_{\mu v}^j) \quad (4.176)$$

де $A_{mn\mu v}^{jl}$ та $B_{mn\mu v}^{jl}$ – векторні трансляційні коефіцієнти, які характеризують перетворення розсіяної від l th сфери хвилі в падаючу для l th сфери. Повне електромагнітне поле, яке падає на визначену частину сфери, що належить угрупованню, складається з двох частин: (1) падаюча первинна плоска хвиля і (2) розсіяні хвилі від сукупності всіх інших сфер. Рівняння (4.173) та (4.175) включають в себе частково розсіяні поля від всіх взаємодіючих сфер і завдають лінійні системи, які мають невизначені коефіцієнти часткового розсіяння від всіх оточуючих сфер.

5 ЕКОНОМІЧНІ ВИСНОВКИ, СПІВПРАЦЯ УКРАЇНИ З ОРГАНІЗАЦІЄЮ МАГАТЕ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ В СФЕРІ ПОВОДЖЕННЯ З РАДІОАКТИВНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

5.1 Економічні висновки

Підбиваючи підсумки можна сказати, що треба звернути увагу на економічну доцільність проекту. Для цього зробимо економічні підрахунки проектування захисного екрану на основі гранульованих матеріалів. Закінчуючи свою дипломну роботу я вважаю за потрібне надати економічну доцільність проекту захисних екранів. Я порівнюю два варіанти конструкцій цих екранів: один на базі бетонних споруд, а інший на базі використання гранульованих матеріалів. Так, як прийняте офіційне Кабінету міністрів України щодо побудови нового автоматично налаштованого сховища ВЯП поблизу Чорнобильської АЕС, а кошторис сховища був оцінений спеціалістами в 1 мільйон 125 тисяч гривень, що в 4,5 рази менш, ніж всі можливі щодо транспортування ВЯП до РФ. Приступаючи до розрахунку двох видів екранів з економічної точки зору, я додаю всі данні в якості таблиці 5.1.

5.2 Співпраця України та міжнародної організації МАГАТЕ

Оскільки в світі існує в 32 країнах більш, ніж 450 АЕС та їх кількість буде зростатиме тому, що ще 30 країн планують побудувати атомні електростанції. Тому, питання безпечного поводження та моніторингу екологічного стану в разі сховищ ВЯП стає найбільш актуальним. [5]

Міжнародна організація МАГАТЕ закликає до безпечної утилізації всіх відпрацьованих радіоактивних відходів, та відпрацьованого палива. На міжнародній конференції від 22.05.2018 р. згідно з рішенням Конвенції

Продовження таблиці 5.1

№ п/п	Показник	Розмірність	Формула розрахунку	Результати
1	2	3	4	5
1	Собівартість: Бетону Гранульованих матеріалів	грн./т	$C_1=L*B*N$ $C_1=r*V$	5000 грн./т 230 грн./т
2	Кількість матеріалу	т	$Q=C_1*N$	$C\Sigma=25254$
3	Дальність перевезення	км	L	520
4	Вартість дизельного палива	грн./т		3000
5	Вартість мастила	грн./т		232
6	Кількість робітників: Бетон Гранульовані матеріали	чол.	N_1 N_2	24 8
7	Норми амортизації споруд Бетон/гранульовані матеріали	%	n_1 n_2	13 11
8	Середня заробітна платня працівників	грн.	Приймаємо	3723
9	Кількість рейсів для завантаження модуля: Бетону Гранульованих матеріалів	од.	Приймаємо	12 10

Таблиця 5.1 — Порівняльна економічна характеристика двох варіантів конструкцій екранів на базі бетонних споруд та на базі використання гранульованих матеріалів

МАГАТЕ та Віденському протоколу, країни що використовують ядерну енергію та ядерне паливо, повинні брати участь та нести сувору відповідальність за безпечну ліквідацію та убезпечення всіх видів ядерних відходів. Про це заявив в своїй промові голова МАГАТЕ Юкія Аmano. На базі міжнародних угод та домовленостей між Україною та МАГАТЕ були зроблені відповідні рішення на національному рівні про проектування та будівництво ЦСВЯП в районі зони відчуження навколо Чорнобильської АЕС. Ці рішення були закріплені відповідними документами, а саме: «Доповідь про стан забезпечення ядерної безпеки України» № 4384-17 від 09.02.2012 р. та «Доповідь про стан ядерної та радіаційної безпеки України» за 2017 рік. [7]

На міжнародній Конференції з питань ядерної безпеки, що проходила у Відні цього року було прийняте рішення про безпеку поводження зі всіма радіаційними відходами та вироблення інструмента, який забезпечує ефективне співробітництво всіх країн стосовно ядерної та екологічної безпеки. Особливо це стосується всіх країн Європи та Північної Америки. В докладі конференції було звернено особливу увагу на проект розробки та побудови сховищ ВЯП в таких країнах як Україна, Туреччина та Іран. Голова МАГАТЕ Аmano відзначив певні успіхи нашої країни в справі побудови захисних споруд та захисних екранів та відзначив необхідність застосування нових матеріалів та технологій, які дозволяють зробити процеси убезпечення ВЯП більш ефективними та надійними. Він закликає цією конвенцією до ще більш тісної взаємної співпраці та приєднання до механізму взаємної підзвітності всіх її учасників. За вимогою Конвенції МАГАТЕ цей механізм підзвітності передбачає та забезпечує регулярні зустрічі та конструктивні консультації всіх країн кожні три роки. На даний час в країнах світу існують та працюють близько 450 ядерних об'єктів, які потребують утилізацію та безпеку транспортування ВЯП. Всі ці сховища ВЯП МАГАТЕ вимагає створювати в найбільш безпечних умовах геологічного та клімато-географічного розташування. [8]

МАГАТЕ має думку, що ядерна енергетика повинна стати одною з найбільш «зелених постачальників енергії» взагалі, оскільки ядерна енергетика значно скорочує викиди парникових газів, а особливо CO₂ в атмосферу Землі. Як казав Голова міжнародного агенства з атомної енергетики Юхія Аmano попит в світі на ядерну енергетику постійно зростатиме, і таким чином питання безпеки поводження в ВЯП стає найбільш актуальним.

Україна експлуатує 15 енергоблоків і займає 9 місце в світі за цим показником, а за встановленою потужністю наших енергоблоків ми знаходимося на 7 місці. Єдиним оператором усіх діючих атомних електростанцій в Україні є Державне підприємство «Національна атомна

енергогенеруюча компанія «Енергоатом» (далі – ДП «НАЕК «Енергоатом»). До складу ДП «НАЕК «Енергоатом» входять 4 атомні електростанції. Загальна встановлена потужність діючих українських енергоблоків – 13 835 МВт. За 2017 рік вироблено 85,8 млрд кВт*год, що становить 55,2% від загального виробництва електроенергії в Україні. Коефіцієнт використання встановленої потужності АЕС у 2017 році склав 70,6%. В Україні забезпечено сталий та безпечний режим роботи АЕС відповідно до Закону України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» та положень Конвенції про ядерну безпеку. На системній основі впроваджуються заходи з підвищення рівня безпеки діючих АЕС України відповідно до вимог національних норм, правил і стандартів з ядерної та радіаційної безпеки, рекомендацій Міжнародного агентства з атомної енергії (далі – МАГАТЕ) та з урахуванням передової міжнародної практики. Партнерські перевірки WANO1 і МАГАТЕ підтвердили безпеку експлуатації енергоблоків АЕС України, робіт, що ведуться на всіх енергоблоках України в рамках діючих програм з підвищення безпеки та продовження терміну експлуатації енергоблоків АЕС. [13]

Заходи з підвищення безпеки енергоблоків АЕС України впроваджуються відповідно до «Комплексної (зведеної) програми підвищення рівня безпеки енергоблоків атомних електростанцій», затвердженої Кабінетом Міністрів України в 2011 році. В 2015 році Кабінет Міністрів України продовжив термін дії К(з)ППБ до 2020 року. Метою К(з)ППБ є:

- подальше підвищення рівня безпеки експлуатації енергоблоків АЕС;
- зменшення ризиків виникнення аварій на АЕС під час стихійного лиха або інших екстремальних ситуацій
- підвищення ефективності управління проектними і запроектними аваріями на АЕС, мінімізація їх наслідків.

В основу К(з)ППБ були покладені заходи з підвищення безпеки попередньої програми: «Концепції підвищення безпеки діючих енергоблоків

атомних електростанцій» 2005 року, що не були виконані експлуатуючою організацією до закінчення терміну дії Концепції, а також заходи з підвищення безпеки енергоблоків № 2 ХАЕС та № 4 РАЕС, що були впроваджені під час введення в експлуатацію даних енергоблоків.

В К(з)ППБ також враховано результати та рекомендації місій МАГАТЕ з «проектної безпеки», проведених на всіх АЕС в рамках імплементації «Меморандуму між Україною та ЄС про розуміння щодо співробітництва в енергетичній галузі» за напрямом «ядерна безпека». [6]

Після аварії на АЕС Фукусіма-Даїчі до програми включені додаткові заходи за результатами позачергової поглибленої переоцінки безпеки українських АЕС («стрес-тестів») і додаткові заходи з протипожежної безпеки. Впровадження заходів з підвищення безпеки дає змогу створити необхідні умови для прийняття рішень щодо можливості продовження строків експлуатації енергоблоків АЕС.

В період з 2017 по 2020 роки закінчуються проектні терміни експлуатації 6 енергоблоків АЕС України.

Протягом 2017 року, в рамках регулюючого супроводу К(з)ППБ Держатомрегулювання погоджено 62 звіти про виконання заходів із 79 запланованих на 2017 рік.

Згідно з план-графіками впровадження заходів К(з)ППБ, основні зусилля експлуатуючої організації в 2017 році було сконцентровано на розробці та впровадженні заходів для енергоблоків № 3,4 Запорізької АЕС, № 3 Рівненської АЕС та №1 Хмельницької АЕС, в рамках діяльності з продовження терміну експлуатації. Досвід впровадження заходів на т.зв. «пілотних» енергоблоках, в подальшому застосовується на інших діючих енергоблоках. [8]

Важливі для безпеки ядерної установки модифікації (зміна конфігурації ЯУ, приведення рівня безпеки ЯУ у відповідність до діючих норм та правил, зміна експлуатаційних документів, модифікація організаційної структури експлуатуючої організації), впроваджуються за погодженням з

Держатомрегулюванням. Держатомрегулювання здійснює постійний контроль на всіх етапах проведення модифікації (розробка концепції, монтаж і пусконаладжувальні роботи, введення в дослідну та/або промислову експлуатацію) шляхом проведення оцінки безпеки матеріалів, що обґрунтовують безпеку та узгодження відповідних технічних рішень, а також – шляхом безпосереднього нагляду за виконанням модифікацій, внесенням змін до експлуатаційної документації та навчанням персоналу. Результати контролю обговорюються на відкритих засіданнях Колегії Держатомрегулювання з залученням всіх зацікавлених сторін, у тому числі і громадськості та представників ЗМІ.

Протягом року Держатомрегулювання проводились комплексні інспекційні обстеження кожного майданчику АЕС з залученням у тому числі і міжнародних експертів. Одним з головних завдань таких інспекцій є безпосередній контроль стану виконання заходів з підвищення безпеки.

На початку 2013 р. Держатомрегулювання спільно із Міністерством енергетики та вугільної промисловості України, Міністерством оборони України, Міністерством екології та природних ресурсів України та Державним агентством України з управління зоною відчуження розробила «Національний план дій за результатами «стрес-тестів» спрямований на підвищення безпеки українських АЕС. Зазначений документ було розроблено у відповідності до рекомендацій Групи Регуляторів Ядерної Безпеки (ENSREG) щодо структури та змісту національних планів дій («National Action Plan (NACP) Guidance as directed within the ENSREG Stress test Action Plan» з додатками). [12]

«Національний план дій за результатами «стрес-тестів» враховує:

- рекомендації та пропозиції ENSREG, що наведені в звіті «Compilation of recommendations and suggestions. Peer review of stress tests performed on European nuclear power plants», за напрямками «Зовнішні екстремальні впливи», «Втрата функцій безпеки» та «Управління важкими аваріями»;

- основні питання Екстраординарної наради країн-учасниць Конвенції про ядерну безпеку (серпень 2012 р., Відень, Республіка Австрія) за напрямками «Національні організації», «Аварійна готовність та реагування» та «Міжнародне співробітництво».

Наприкінці 2017 року було виконано повторне оновлення Національного плану дій України за результатами «стрес-тестів» щодо поточного стану та термінів реалізації заходів. Кількість запланованих заходів та їх обсяг не зазнав змін.

Роботи з впровадження палива виробництва компанії «Westinghouse» розпочато у 2000 році в рамках Виконавчої угоди між Урядом України та Урядом Сполучених Штатів Америки стосовно Проекту кваліфікації ядерного палива для України, підписаної 5 червня 2000 року. Мета проекту – розробка, постачання на АЕС України та кваліфікація альтернативного ядерного палива, сумісного з паливом російського виробництва. [2]

Впровадження тепловиділяючих збірок (далі – ТВЗ), виробництва компанії «Westinghouse», як будь-якої нової модифікації ядерного палива для АЕС України чітко регламентується нормативно-правовими документами з ядерної та радіаційної безпеки. Цими документами визначені послідовні кроки, які має зробити експлуатуюча організація і кожен з яких ретельно аналізується та контролюється Держатомрегулювання – від концептуального рішення щодо впровадження нового палива до його введення в промислову експлуатацію.

Відповідність законодавчої бази України з ядерної та радіаційної безпеки стандартам МАГАТЕ, у тому числі процедури ліцензування нового ядерного палива, було підтверджено під час реалізації спільного проекту «ЕС-IAEA-UKRAINE JOINT PROJECT on Safety Evaluation of Ukrainian NPPs» у 2007–2010 роках.

У рамках першого етапу Проекту кваліфікації у період з 2005 по 2010 роки на енергоблоці №3 ЮУАЕС було проведено дослідну експлуатацію шести пілотних ТВЗ-W протягом чотирьох паливних кампаній. На другому

етапі Проекту кваліфікації з березня 2010 року розпочато дослідну експлуатацію перевантажувальної партії у складі 42 ТВЗ-W виробництва Westinghouse. [6]

Протягом 2011–2012 років у рамках контракту на постачання ядерного палива між ДП «НАЕК «Енергоатом» та компанією «Westinghouse Electric Sweden AB» (м. Вастерос, Швеція) та з урахуванням підходів до розширення дослідної експлуатації ТВЗ-W – було здійснено постачання чотирьох партій ядерного палива, з яких дві завантажено в активні зони енергоблоків №2 та №3 ЮУАЕС у ході планово- попереджувальних ремонтів (далі – ППР) у 2011 році.

Під час ППР-2012 у процесі перевантаження змішаних активних зон реакторів енергоблоків № 2 та № 3 ЮУАЕС, через особливості паливних збірок обох виробників (ВАТ «ТВЕЛ» та «Westinghouse»), які входили до складу паливних завантажень, виникли ускладнення із завантаженням збірок у активну зону. [12]

У зв'язку з цим подальше розширення експлуатації палива компанії «Westinghouse» у рамках контракту було тимчасово призупинено. Експлуатація ТВЗ- W продовжувалась виключно в активній зоні енергоблоку №3 ЮУАЕС.

Відповідно до Програми дослідно-промислової експлуатації ТВЗ-W компанії «Westinghouse» на енергоблоці №3 (на період дослідно-промислової експлуатації) під час кожного ППР ТВЗ-W, які експлуатувались у паливному завантаженні, проходили візуальний огляд та контроль на герметичність. У тому числі це стосувалось ТВЗ 4-го року експлуатації, тобто тих, які відпрацювали повний цикл передбачений проектною документацією на них і вивантажених на зберігання в приреакторний басейн витримки. Отримані результати засвідчили відсутність зауважень до ТВЗ-W. Таким чином, можна зазначити, що за час експлуатації перевантажувальної партії палива компанії «Westinghouse» протягом 2010–2014 років, не дивлячись на випадки

пошкодження конструкційних елементів ТВЗ-W, не було зафіксовано жодного випадку розгерметизації цих ТВЗ.

Після подій 2012 року, з метою поновлення дослідної експлуатації ТВЗ-W, між ДП «НАЕК «Енергоатом» та компанією «Westinghouse», за погодженням з Держатомрегулювання, опрацьовано комплекс заходів, у тому числі обсяг необхідних доопрацювань та модифікації конструкції паливної збірки. Компанією Westinghouse проведено повний комплекс випробувань, у лабораторних умовах, модифікованої збірки (далі – ТВЗ-WR). Розроблено звіт з аналізу безпеки використання модифікованої збірки, який пройшов державну експертизу з ядерної та радіаційної безпеки. За результатами виконаних у 2015 році робіт розпочато, в установленому порядку, дослідну експлуатацію ТВЗ-WR на енергоблоці №3 ЮУАЕС. У рамках розширення дослідної експлуатації, станом на сьогоднішній день, ТВЗ-WR експлуатуються також у складі паливних завантажень енергоблоків №2 та №3 ЮУАЕС та №1,3,4,5 ЗАЕС. За час експлуатації ТВЗ-WR протягом 2015-2017 років передумов для порушення умов безпечної експлуатації енергоблоків не виявлено. [4]

Об'єкти поводження з відпрацьованим ядерним паливом

У технологічному циклі АЕС одним їх важливих компонентів являється відпрацьоване ядерне паливо (ВЯП), яке утворюється в процесі виробництва енергії в ядерних реакторах. Термін використання ядерного палива в реакторах визначається величиною допустимої глибини вигорання ізоотопів, що діляться. Після досягнення запланованої глибини вигорання ядерне паливо вивантажуються з реактора і вважається відпрацьованим, оскільки не може безпосередньо використовуватися для виробництва енергії.

Після вивантаження з активної зони реактора ВЯП перевантажується в приреакторні басейни витримки (БВ). У цих басейнах ВЯП витримуються протягом часу, необхідного для зниження енерговиділення, обумовленого радіоактивним розпадом продуктів поділу, до допустимих величин. Після зберігання ВЯП в БВ протягом обмеженого часу, відпрацьовані

тепловиділяючі збірки (ВТВЗ), повинні видалятися з енергоблоку АЕС і направлятися на зберігання (захоронення) або переробку. Це пов'язано з тим, що місткість БВ енергоблоків АЕС обмежена і в них завжди має бути вільний об'єм для вивантаження ядерного палива з активної зони реактору або періодичних ревізій корпусу і внутрішньокорпусних пристроїв реакторів ВВЕР.

Водночас при поводженні з ВЯП необхідно враховувати чинники, які визначаються специфікою цього матеріалу: високий рівень радіоактивності і наявність у складі ВЯП цінних компонентів (уран, плутоній, германій, ербій, паладій, цирконій та ін.), які в перспективі можуть використовуватися, у тому числі в інших ядерних циклах (ядерне паливо для реакторів на швидких нейтронах, МОХ-паливо для легководних реакторів). Враховуючи зазначене ВЯП не відносять до радіоактивних відходів. [10]

Існуючий стан атомної енергетики у світі показує, що при сучасному рівні розвитку технологій, остаточні висновки про економічну доцільність переробки або захоронення ВЯП, тобто про завершальну стадію ядерно - паливного циклу (ЯПЦ), не можуть бути зроблені. У зв'язку з цим, Україна, як і більшість країн, що розвивають атомну енергетику, прийняла для себе так зване «відкладене рішення», яке передбачає організацію довгострокового зберігання ВЯП. Зазначене «відкладене рішення» дозволяє прийняти рішення щодо завершальної стадії ЯПЦ пізніше з урахуванням розвитку технологій у світі і економічної вигоди для держави.

В даний час в Україні експлуатуються два сховища, призначених для тимчасового зберігання відпрацьованого палива: сховище ВЯП «мокрого» типу – СВЯП-1 Чорнобильської АЕС та сховище ВЯП «сухого» типу – ССВЯП Запорізької АЕС. Окрім цього, в Україні будуються ще два сховища: сховище ВЯП «сухого» типу – СВЯП-2 Чорнобильської АЕС та централізоване сховище ВЯП реакторів типу ВВЕР вітчизняних АЕС – ЦСВЯП.

Поводження з ВЯП реакторів типу ВВЕР/

Першою з проблемою відсутності вільних місць в БВ енергоблоків АЕС для ВЯП зіткнулася Запорізька АЕС. Вирішуючи це питання Запорізька АЕС розпочала у 1996 році реалізацію проекту ССВЯП. Проект ССВЯП розроблено на підставі ліцензованої та не раз випробуваної технології зберігання ВЯП фірми “Duke engineering & services” (США). Принцип зберігання ВЯП наступний: 24 паливні касети з низьким енерговиділенням ($<1 \text{ кВт}$) після 5 років витримки у БВ, розміщують у спеціальний кошик, заповнюють його гелієм (інертним газом з великою теплопровідністю) та герметизують, потім кошик розташовують у бетонному вентилярованому контейнері зберігання (ВКЗ). Сховище розраховане на 380 ВКЗ, у яких можна розташувати 9000 касет з ВЯП. [13]

Перша черга ССВЯП місткістю 100 ВКЗ була введена в експлуатацію у 2001 році, а друга, місткістю 280 ВКЗ – наприкінці 2011 року.

Станом на 01.01.2018 р. на майданчику ССВЯП знаходиться 145 вентиляваних бетонний контейнер. Протягом 2017 р. Держатомрегулюванням розглянуті та погоджені 4 технічних рішення «О составе загрузки местных герметичных корзин отработавшим ядерным топливом». ВЯП Рівненської, Хмельницької та Южно-Української АЕС в даний час вивозиться до Російської Федерації. ВЯП реакторів ВВЕР-1000 – на зберігання, а ВЯП реакторів ВВЕР-440 (енергоблоки №1,2 РАЕС) – на переробку.

На виконання «Плану заходів на 2006-2010 роки стосовно реалізації Енергетичної стратегії України на період до 2030 року» (затвердженого розпорядженням Кабінету Міністрів України № 427 від 27 липня 2006 року) експлуатуюча організація ДП «НАЕК «Енергоатом» уклала контракт з американською фірмою «Holtec International» на будівництво в Україні централізованого сховища для зберігання ВЯП відпрацьованого ядерного палива Рівненської, Хмельницької та Южно-Української АЕС на основі вже випробуваної на Запорізькій АЕС технології сухого зберігання. У відповідності до вимог законодавства експлуатуючою організацією ДП

«НАЕК Енергоатом» було розроблене «Техніко-економічне обґрунтування інвестицій (ТЕО) у будівництво централізоване сховище відпрацьованого ядерного палива (ЦСВЯП) реакторів типу ВВЕР вітчизняних атомних електростанцій», яке, після проведення комплексної державної експертизи, було схвалене розпорядженням Кабінету Міністрів України від 04.02.2009 р. № 131-р. Зазначеним ТЕО було доведена економічна доцільність довгострокового зберігання ВЯП в Україні, у порівнянні з його відправкою на переробку до Російської Федерації та обґрунтоване будівництво одного централізованого сховища ВЯП у порівнянні з будь-якими іншими варіантами зберігання ВЯП. В ЦСВЯП передбачається зберігання протягом 100 років 12500 ВТВЗ реакторів типу ВВЕР-1000 та 4000 ВТВЗ реакторів типу ВВЕР-440. [13]

09.02.2012 р. Законом України №4383-VI «Про поводження з відпрацьованим ядерним паливом щодо розміщення, проектування та будівництва централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива реакторів типу ВВЕР вітчизняних атомних електростанцій» Верховною Радою України прийнято рішення щодо розміщення ЦСВЯП на території зони відчуження, а також стосовно його проектування та будівництва.

30.04.2013 р. Держатомрегулюванням погоджений документ ДП «НАЕК «Енергоатом»» «Технічне завдання на модифікацію технології відвантаження ВЯП з енергоблоку ВВЕР-1000 (РУ В-320) для забезпечення його вивезення в ЦСВЯП».

23.04.2014 р. розпорядженням Кабінету Міністрів України №399-р ДП «НАЕК «Енергоатом»» надано дозвіл на розроблення проекту землеустрою щодо відведення земельних ділянок загальною площею 45,2 га, що розташовані між колишніми селами Стара Красниця, Буряківка, Чистогалівка та Стечанка Київської області у зоні відчуження території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи, та з подальшим наданням їх зазначеному підприємству у постійне користування

із зміною цільового призначення для будівництва ЦСВЯП та під'їзної залізничної колії.

22.07.2015 р. Держатомрегулюванням погоджений оновлений «План ліцензування створення централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива» (ПН-Д.0.46.527-15), розроблений на заміну ПН-Д.0.46.527-11.

23.07.2015 р. Держатомрегулювання узгоджені пропозиції експлуатуючої організації до складу та змісту пояснювальної записки «Проекту будівництва Централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива реакторів ВВЕР АЕС України» та надано рекомендації до самого проекту ЦСВЯП.

12.10.2015 наказом ДП НАЕК «Енергоатом» за №926 створено керівний комітет із впровадження технології Холтек з поводження з ВЯП на енергоблоках ВП РАЕС, ВП ХАЕС, ВП ЮУАЕС, до складу якого включено представника Держатомрегулювання та ДНТЦ ЯРБ.

05.10.2016 р. розпорядженням КМУ за №721-р вилучено з постійного користування Державного агентства з управління зоною відчуження земельну ділянку площею 45,2 га та надано у постійне користування ДП «НАЕК «Енергоатом» для будівництва та експлуатації ЦСВЯП.

03.11.2016 р. постановою Колегії Держатомрегулювання № 08 схвалений висновок державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки ПЗАБ ЦСВЯП.

07.12.2016 р. ДП «НАЕК «Енергоатом» забезпечено реєстрацію декларації на початок виконання підготовчих робіт № ІУ030163421149.

07.06.2017 р. Кабінет Міністрів України розпорядженням № 380-р затвердив проект «Будівництво централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива реакторів типу ВВЕР вітчизняних атомних електростанцій».

29.06.2017 р. Держатомрегулюванням видано ДП «НАЕК «Енергоатом» ліцензію № ЕО 001060 на право провадження діяльності на етапах життєвого циклу «будівництво та введення в експлуатацію» ядерної

установки (Централізоване сховище відпрацьованого ядерного палива реакторів ВВЕР вітчизняних атомних електростанцій (ЦСВЯП))».

09.11.2017 р. проведення у смт Буряківка (Зона відчуження) урочистих заходів стосовно початку будівництва ЦСВЯП. [5]

Окрім цього, протягом 2017 року Держатомрегулюванням забезпечено:

- розгляд 15 комплектів технічних специфікацій на обладнання важливе для безпеки, за результатами якого до ДП НАЕК «Енергоатом» направлені попередні коментарі;

- попереднє погодження, за результатами державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки 3 технічних специфікацій (далі - ТС);

- розглянуто та за результатами направлено попередні коментарі 3 програм приймальних випробувань на заводі виробнику;

- розгляд низки технічних рішень щодо впровадження технології Holtec у частині підготовки ВЯП до зберігання в ЦСВЯП на енергоблоках АЕС України;

- участь у засіданнях Керівного комітету із впровадження технології Holtec з поводження з ВЯП на енергоблоках ВП РАЕС, ВП ХАЕС, ВП ЮУАЕС.

5.3 Охорона праці та правові заходи в галузі ядерної енергетики

Усі роботи з радіоактивними речовинами (РР) та іншими джерелами РВ мають бути організовані таким чином, щоб забезпечувалася радіаційна безпека персоналу і населення, а також охорона навколишнього середовища від радіоактивного забруднення.

Вимоги, що забезпечують радіаційну безпеку таких робіт, викладені в "Основних санітарних правилах роботи з радіоактивними речовинами й іншими джерелами РВ ОСП-72/87". Це вимоги до розміщення установок; організації робіт і робочих місць; одержання, обліку, зберігання і перевезення джерел РВ; вентиляції, пилогазоочищення, опалення, водопостачання і

каналізації; зберігання, видалення і знешкодження радіоактивних відходів. В ОСП сформульовані положення щодо вмісту РР і дезактивації робочих приміщень та устаткування; про заходи індивідуального захисту й особистої гігієни; з організації радіаційного дозиметричного контролю; з попередження радіаційних аварій і ліквідації їх наслідків.

Виробництво, обробка, застосування, зберігання, транспортування джерел РВ, переробка і знешкодження радіоактивних відходів здійснюється з дозволу і під контролем органів та установ Держсаннагляду, яким надається відповідної установи. [7]

Місця для розміщення установ, призначених для роботи з джерелами РВ, мають відповідати вимогам "Санітарних норм проектування промислових підприємств СН245-71*" та ОСП.

Забороняється розміщення таких установ у житлових будинках, громадських і дитячих закладах. Місця для будівництва установ, призначених для роботи з відкритими джерелами, слід вибирати з підвітряної сторони щодо житлових будинків, дитячих, громадських закладів, зон відпочинку.

Навколо установ із джерелами РВ у разі потреби встановлюється санітарно-захисна зона (СЗЗ) і зона спостереження (ЗС). У СЗЗ при нормальній роботі установи рівень опромінення людей може перевищити ГД, тому тут забороняється будівництво житлових будинків, а також будинків і споруд, що не стосуються роботи цієї установи. У зоні спостереження опромінення може досягати ГД, але у ній проводиться радіаційний контроль.

Розміри зон визначаються на основі розрахунку дози зовнішнього опромінення, поширення радіоактивних викидів у атмосферу і скидів у водоймища й у кожному конкретному випадку встановлюються за узгодженням із органами Держсаннагляду. Розміри ЗС звичайно в кілька разів більші, ніж СЗЗ. Наприклад, СЗЗ АБС має радіус 3-5 км, а ЗС може простягатися на відстань 20-30 км від АЕС.

Устаткування, контейнери, упаковка, транспортні засоби, приміщення, призначені для робіт із джерелами РВ, повинні мати попереджувальний знак радіаційної небезпеки. [13]

Установи, приміщення й установки для роботи з джерелами РВ до початку їх експлуатації мають бути прийняті компетентною комісією на підставі акта приймання. Місцеві органи Держсаннагляду оформляють на термін до трьох років санітарний паспорт установи, що дає право зберігання і проведення робіт із джерелами РВ. Адміністрація установи:

- визначає перелік осіб для роботи з джерелами РВ;
- розробляє правила внутрішнього розпорядку, інструкцію з радіаційної безпеки, інструкцію з попередження і ліквідації аварій;
- навчає й інструктує працівників;
- періодично перевіряє знання правил ведення робіт і чинних інструкцій;
- призначає відповідальних за радіаційний контроль і безпеку;
- організовує обов'язковий медичний контроль при прийнятті на роботу і періодичні медогляди.

В інструкції з радіаційної безпеки викладаються порядок проведення робіт; облік зберігання і видачі джерел РВ; скидання і видалення радіоактивних відходів; стан приміщень; заходи особистої профілактики; організація проведення радіаційного контролю.

Найбільш складний комплекс захисних заходів передбачається при роботі з РР у відкритому вигляді, оскільки необхідно забезпечити захист людей не тільки від зовнішнього, а й від внутрішнього опромінення і запобігти забрудненню навколишнього середовища. Така небезпека існує при роботі ядерних реакторів, у радіохімічному виробництві, особливо при проведенні ремонтів.

До основних захисних заходів належать: вибір устаткування, технологічних режимів, планування й обробка приміщень; раціональне планування робочих місць, режиму вентиляції, захисту від зовнішнього і внутрішнього опромінення, збирання й утилізації радіоактивних відходів;

дотримання заходів особистої гігієни і використання засобів індивідуального захисту.

За ступенем радіаційної небезпеки РР поділяються на чотири групи в міру зменшення небезпеки: А, Б, В, Г. Залежно від групи РР і фактичної активності їх на робочому місці встановлюється три класи робіт (табл. 3.10). Приміщення для робіт класів І і ІІ ізолюють від інших та обладнують санпропускником, душовою і пунктом радіаційного контролю. Приміщення для робіт класу І розділяються на три зони:

- перша зона — приміщення, що не обслуговуються, де розміщуються основні джерела ІВ і радіоактивного забруднення;
- друга зона - завантаження, що обслуговується періодично під час ремонту і вивантаження РР, тимчасового зберігання і видалення радіоактивних відходів;
- третя зона - приміщення постійного перебування персоналу* Для виключення можливості винесення забруднень між приміщеннями другої і третьої зони обладнується спеціальний шлюз. Стіни, підлоги, стелі, устаткування і робочі меблі в приміщеннях для робіт класів ІІ і І мають мати гладку поверхню і слабо сорбуючі покриття, що полегшують видалення радіоактивних забруднень. Краї покриття підлоги повинні бути закріплені й забиті врівень зі стінами. Вентиляційні й повітроочисні пристрої мають забезпечити захист від забруднення повітря всередині приміщень та зовнішнього повітря.

На етапах одержання, транспортування і зберігання джерел РВ передбачається виконання комплексу організаційних, технічних та інших заходів, що запобігають їх уособлюванню і потраплянню в навколишнє середовище. Тут важливі дисциплінованість і відповідальне ставлення до виконання посадових обов'язків. Негативні приклади, що характеризують можливість радіоактивного забруднення НС і навіть безконтрольного поширення компонентів ядерної зброї, неодноразово наводилися в засобах масової інформації.

Одержання, облік і зберігання джерел радіоактивних випромінювань

Постачання установі джерел РВ проводять за заявкою, погодженою з органами Держсаннагляду і внутрішніх справ. Адміністрація установи несе відповідальність за збереження джерел РВ і має забезпечити такі умови зберігання, надходження, одержання, використання, витрати і списання з обліку всіх джерел РВ, за яких виключається можливість їх втрати чи безконтрольного використання. Джерела РВ мають приймати відповідальні особи, які призначені наказом керівника установи і ведуть систематичний облік наявності і руху джерел РВ в установі, у підзвітних осіб, у сховищах і відходах.

Виконавці робіт одержують джерела РВ тільки за письмовим дозволом керівника, від ним уповноваженої особи, несуть відповідальність за збереження джерел з моменту одержання до їх повернення чи списання.

Умови безпеки транспортування РР регламентуються "Правилами безпеки при транспортуванні РР" й основними правилами безпеки і фізичного захисту під час перевезення ядерних матеріалів (ОПБЗ-83).

РР транспортуються як безпечні вантажі, якщо їх активність є меншою за встановлену межу (для різних радіонуклідів від 106 до 102 Ки) при потужності еквівалентної дози на поверхні упаковки не більше 3 мкЗв/годину. Транспортування радіоактивних вантажів здійснюється в транспортних пакувальних комплектах, що можуть складатися з кількох елементів, вкладених один в іншій. [12]

За матеріалом, із якого виготовлені захисні протирадіаційні пристрої (ПРП), пакувальні комплекти поділяються на три види:

I - для перевезення у та інших видів РВ, крім нейтронного. Захисні ПРП роблять зі свинцю, чавуна, сталі чи інших важких матеріалів;

II - для перевезення джерел нейтронних випромінювань. Захисні ПРП роблять із матеріалів, що містять водень, із додаванням бору і кадмію;

III - для джерел β -випромінювання; захисні ПРП виготовляють із легких матеріалів (алюмінію, пластмас).

За здатністю зберігати захисні і герметичні властивості при зовнішніх впливах пакувальні комплекти поділяють на два типи:

А - витримують впливи, що трапляються у звичайній практиці транспортування (падіння з невеликої висоти, удар сусіднього вантажу, стискання, злива);

В - витримують аварійні умови без зміни захисних властивостей. Установлено чотири транспортні категорії радіаційної упаковки (I, II, III, IV), що визначаються рівнем радіації в будь-якій точці на зовнішній поверхні упаковки та на відстані 1 м від неї.

Із розвитком атомної промисловості та енергетики зростає і кількість радіоактивних відходів, які мають бути ізольовані, щоб виключити радіаційний вплив на об'єкти навколишнього середовища не тільки нинішнього, а й майбутніх поколінь.

До радіоактивних відходів належать розчини, вироби, матеріали, що містять РВ понад чинні норми і які не можуть бути використані у цей час у практичній діяльності. До радіоактивних відходів належать також активовані нейтронами конструкційні матеріали і непридатні до подальшої дезактивації деталі машин, конструкцій, покриттів, спецодягу, засобів індивідуального захисту, що відпрацювали експлуатаційний термін. [13]

За агрегатним станом розрізняють тверді та рідкі радіоактивні відходи. Рідкі відходи вважаються радіоактивними, якщо вміст у них радіонуклідів або їх сумішей перевищує допустимі концентрації ДКБ, установлені НРБУ-97 для води. Тверді відходи вважаються радіоактивними, якщо їх питома активність є більшою ніж:

- $2 \cdot 10^{-7}$ у -7 ступені Ки/кг - для джерел α -випромінювання;
- $2 \cdot 10^{-6}$ у -6 ступені Ки/кг — для джерел β -випромінювання;
- 10^{-7} у -7 ступені Ки/кг - для джерел γ -випромінювання.

За ступенем небезпеки радіоактивні відходи поділяються на низькоактивні, небезпечні тільки при потраплянні всередину організму, середньоактивні, що становлять небезпеку як при внутрішньому, так і при

зовнішньому опроміненні, та високоактивні, які через високу питому активність і велике енерговиділення потребують додаткового охолодження ємностей, у яких вони містяться. Саме порушення системи охолодження призвело до Киштимської трагедії у 1957 р.

До низькоактивних належать, наприклад, відходи, що утворюються при видобутку і переробці уранової руди, дезактиваційні води, активовані елементи конструкції першого контуру АЕС, спецодяг. До середньоактивних відходів належать оболонки твелів тощо. До високоактивних відходів належать відпрацьовані в реакторі твели, очисні розчини, одержані при регенерації ядерного палива на радіохімічних заводах та ін.

Способи поховання радіоактивних відходів залежать від їх питомої активності, агрегатного стану і габаритів. Низькоактивні відходи гірничо-збагачувальних уранових заводів розміщують у хвостосховище на місцях, оточених дамбами або греблями, з твердим чи водяним покриттям.

Дозволяється скидання рідких радіоактивних відходів з концентрацією до 10 ДКБ (допустимих концентрацій) у каналізацію, якщо забезпечується їх десятиразове розведення нерадіоактивними стічними водами в колекторі цієї установки. У противному разі споруджують спецканалізацію з очисними спорудами або збирають відходи у спеціальні ємності і далі їх відправляють на поховання.

Перед похованням радіоактивні відходи, як правило, переробляють з метою зменшення об'єму. Тверді відходи пресують, переплавляють чи спалюють, а потім цементують чи бетонують у блоки. Рідкі відходи концентрують методом випарювання, хімічного осадження або іонного обміну, а потім цементують чи бетонують. [8]

Із високоактивних відходів вилучають довгоживучі радіонукліди: цезій, стронцій, трансуранові елементи, а потім такі відходи піддають силуванню, кальцинуванню, що зводить до мінімуму їх вилучення під дією зовнішнього середовища. Підготовлені до поховання радіоактивні відходи мають твердий стан.

Пункти поховання радіоактивних відходів розташовують за межами зон перспективного розвитку населених пунктів і зон відпочинку, а також не ближче 500 м від відкритих водоймищ. Навколо пункту поховання створюється санітарно-захисна зона.

Поховання низькоактивних відходів проводять у простих чи бетонованих траншеях, котлованах і засипають шаром ґрунту завтовшки не менше 1 м.

Поховання середньоактивних відходів проводять у спеціальних могильниках, що є бетонованими сховищами глибиною близько 20 м, шириною 25 м, довжиною 100-200 м, розділених на відсіки. Товщина бетонного шару близько 1 м. Відсіки заповнюються твердими відходами до половини глибини, проміжки заливають бетоном на основі відстояних рідких відходів і зверху покривають шарами бетону і глини, що перешкоджає надходженню дощових і ґрунтових вод.

Передбачається, що через 100 років після поховання радіоактивних відходів ця ділянка землі буде придатна для ведення сільського господарства чи будівництва будинків. Такий пункт поховання радіоактивних відходів для східних областей України розташований в районі с. Пересічне, а в Харкові працює спецкомбінат з дезактивації. [9]

Для поховання високоактивних відходів можуть використовуватися вироблені соляні і вугільні шахти в геологічно спокійних районах.

Аби захистити людей і навколишнє середовище від трагічних випадків, фахівцям усіх рангів, що проектують, будують і експлуатують об'єкти та устаткування з використанням джерел РВ, необхідні глибокі професійні знання, висока особиста відповідальність, дисципліна і педантизм у неухильному виконанні вимог радіаційної безпеки, викладених у нормативних документах.

5.4 Охорона праці в галузі ядерної енергетики

Важливою гарантією екологічної безпеки є додержання екологічних вимог у промисловості, будівництві, на транспорті, в сільському господарстві, при проведенні наукових досліджень, а також при розміщенні і розвитку населених пунктів. Підприємства, установи й організації, діяльність яка пов'язана зі шкідливим впливом на навколишнє природне середовище, незалежно від часу введення їх у дію мають бути ,обладнані спорудами, устаткуванням і пристроями для очищення викидів і скидів або їх знешкодження, зменшенням впливу шкідливих факторів, а також приладами контролю за кількістю і складом забруднюючих речовин та за характеристиками шкідливих факторів. Забороняється введення в дію підприємств, споруд та інших об'єктів, на яких не забезпечено в повному обсязі додержання всіх екологічних вимог і вжиття заходів, передбачених у проектах на будівництво та реконструкцію. Ефективність діяльності паливно-енергетичного комплексу викликає чимало запитань у вчених, економістів та фахівців цієї галузі. До об'єктів ПЕК відносяться теплові, атомні і гідроелектростанції, котельні; ядерно-промисловий комплекс; підприємства вугільної промисловості – вугледобувні, вуглезбагачувальні та вуглепереробні; підприємства нафтогазового комплексу; лінії електропередачі та тепломережі; газо-, нафто- та продуктопроводи. Усі вони разом і кожний окремо негативно впливають на довкілля і належать до категорії екологічно небезпечних. А в умовах аварійних, надзвичайних та катастрофічних ситуацій можуть перетворитися на реальну загрозу національній безпеці. Ці об'єкти несуть загрозу стану атмосферного повітря, прискорюють парникові явища, впливають на стан поверхневих та підземних вод, ґрунтів, спотворюють природні ландшафти, особливо у вугільній промисловості, є джерелами забруднення довкілля шкідливими речовинами, викликають теплові, радіаційні, електромагнітні, акустичні та інші фізичні впливи, що виявляється в локальному, регіональному і глобальному

масштабах. Для надійного функціонування ядерної галузі енергетики актуальними є такі завдання: забезпечення гарантованого постачання свіжого ядерного палива та утилізація відпрацьованого; вдосконалення системи фізичного захисту ядерних об'єктів та створення системи протидії ядерному тероризму, забезпечення безпечного поводження з радіоактивними відходами; дотримання норм ядерної, радіаційної та екологічної безпеки, забезпечення постачань необхідного обладнання, підтримка необхідного рівня науково-інженерної і проектно-конструкторської діяльності тощо. Правовідносини у сфері поводження з радіоактивними відходами регулюються Законом України "Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку" та ЗАКОНОМ УКРАЇНИ Про поводження з радіоактивними відходами від 30.06.1995р. Цей Закон спрямований на забезпечення захисту людини та навколишнього природного середовища від шкідливого впливу радіоактивних відходів на сучасному етапі та в майбутньому. Закон поширюється на всі види діяльності з радіоактивними відходами. Радіоактивні відходи - матеріальні об'єкти та субстанції, активність радіонуклідів або радіоактивне забруднення яких перевищує межі, встановлені діючими нормами, за умов, що використання цих об'єктів та субстанцій не передбачається; Державний реєстр радіоактивних відходів - послідовний поточний запис актів спеціальної форми про утворення, фізико-хімічний склад, обсяги, властивості, а також перевезення, зберігання та захоронення радіоактивних відходів; ПОРЯДОК ПОВОДЖЕННЯ З РАДІОАКТИВНИМИ ВІДХОДАМИ Стаття 17. Зберігання та захоронення радіоактивних відходів. Зберігання та захоронення радіоактивних відходів дозволяється тільки у спеціально призначених для цього сховищах радіоактивних відходів. Під час зберігання або захоронення радіоактивних відходів забезпечується надійність їх ізоляції від навколишнього природного середовища системою природних та штучних бар'єрів. Кількість радіонуклідів, що підлягають захороненню, регламентується нормами, правилами і стандартами з ядерної та радіаційної безпеки. Забороняється

діяльність, пов'язана з поводженням з радіоактивними відходами, якщо не вжито заходів щодо забезпечення фізичного захисту. Перевезення радіоактивних відходів можуть здійснювати юридичні або фізичні особи, які мають відповідні ліцензії, видані у встановленому законодавством порядку. Перевезення радіоактивних відходів здійснюється у транспортних пакувальних комплектах відповідно до затверджених норм, правил і стандартів щодо перевезення радіоактивних відходів. Експлуатація сховищ радіоактивних відходів дозволяється після отримання ліцензії на право поводження з радіоактивними відходами. [14]

Законодавство України встановлює дисциплінарну, адміністративну, цивільну та кримінальну відповідальність за порушення екологічного законодавства. Дисциплінарна відповідальність являє собою різновид юридичної відповідальності, який настає за еколого-правові проступки, що пов'язані з неналежним виконанням службових обов'язків посадової особи. Законодавство України не встановлює конкретного переліку дисциплінарних проступків у галузі екології, за які настає дисциплінарна відповідальність. Видами дисциплінарних стягнень згідно зі ст. 147 Кодексу Законів про працю України від 10.12.71 є догана і звільнення з роботи. Дисциплінарна відповідальність у сфері екології настає за екологічні правопорушення, вчинені працівником у процесі виконання ним службових обов'язків, встановлених правилами, статутами, положеннями, правилами внутрішнього трудового розпорядку. Така відповідальність може бути застосована до правопорушника лише адміністрацією підприємства або керівництвом фірми, крім керівників структурних підрозділів і головних спеціалістів, які не належать до адміністрації. Так, згідно з постановою Кабінету Міністрів України від 13.06.00 затверджено Порядок проведення службового розслідування стосовно державних службовців (п. 1 цього Порядку) у разі: невиконання або неналежного виконання ними службових обов'язків; перевищення своїх повноважень, що призвело до людських жертв або заподіяло значну матеріальну чи моральну шкоду громадянину, державі,

підприємству, установі, організації чи об'єднанню громадян тощо. Дисциплінарне стягнення може накладатися за правопорушення незалежно від настання екологічних наслідків, лише за формальним складом, тобто за одним лише фактом вчинення правопорушення. Адміністративна відповідальність у сфері екології настає за скоєння еколого-правових проступків. Адміністративні стягнення покладаються на юридичних і фізичних осіб, які мають різний статус: посадових осіб, громадян за порушення загальнообов'язкових правил поведінки, загального порядку щодо використання природних ресурсів, охорони навколишнього природного середовища і забезпечення екологічної безпеки, встановлених для всіх громадян, незалежно від місця і характеру їх роботи. [14]

Згідно з Кодексом України про адміністративні правопорушення (КУпАП) від 07.12.84 адміністративними стягненнями, що застосовуються до винних у порушенні вимог екологічного законодавства, є: попередження; штраф; конфіскація знарядь і засобів вчинення правопорушення, які є особистою власністю порушника; вилучення незаконно добутих об'єктів природних ресурсів; позбавлення права заняття певним видом діяльності у галузі екології (наприклад, правом полювання). У ст.ст. 47—50 гл. 6 КУпАП зазначені адміністративні правопорушення, що посягають на власність, а саме: порушення права державної власності на надра, ліси, на тваринний світ.

У ст.52-91-3 гл. 7 КУпАП зазначено адміністративні правопорушення в галузі охорони природи і використання природних ресурсів, зокрема: псування і забруднення сільськогосподарських та інших земель; порушення правил використання земель; самовільне зайняття земельних ділянок; приховування даних земельного кадастру; несвоєчасне повернення тимчасово зайнятих земель або неприведення їх у стан, придатний для використання за призначенням; самовільне відхилення від проектів внутрішньогосподарського землеустрою; знищення межових знаків; порушення вимог щодо охорони надр; порушення правил і вимог проведення робіт з геологічного вивчення надр; порушення правил охорони водних

ресурсів; порушення вимог щодо охорони територіальних і внутрішніх морських вод від забруднення і засмічення; порушення правил водокористування; пошкодження водогосподарських споруд і пристроїв, порушення правил їх експлуатації; невиконання обов'язків з реєстрації в судових документах операцій з шкідливими речовинами і сумішами; незаконне використання земель державного лісового фонду; порушення встановленого порядку використання лісосічного фонду, заготівлі і вивезення деревини, заготівлі живиці; незаконна порубка, пошкодження та знищення лісових культур і молодняка; знищення або пошкодження полезахисних лісових смуг і захисних лісових насаджень; знищення або пошкодження підросту в лісах; здійснення лісових користувань не у відповідності з метою або вимогами, передбаченими в лісорубному квитку (ордері) або лісовому квитку; порушення правил відновлення і поліпшення лісів, використання ресурсів спілої деревини; пошкодження сінокосів і пасовищних угідь на землях державно-лісового фонду; самовільне сінокосіння і випасання худоби, самовільне збирання дикорослих плодів, горіхів, грибів, ягід; введення в експлуатацію виробничих об'єктів без обладнання, що запобігає шкідливому впливу на ліси; пошкодження лісу стічними водами, хімічними речовинами, нафтою і нафтопродуктами, шкідливими викидами, відходами і покидьками; засмічення лісів відходами; знищення або пошкодження лісоосушувальних каналів, дренажних систем і шляхів на землях державного лісового фонду; знищення корисної для лісу фауни; порушення вимог пожежної безпеки в лісах; самовільне випалювання сухої рослинності або її залишків; порушення порядку здійснення викиду забруднюючих речовин в атмосферу або шкідливого впливу на неї фізичних і біологічних факторів (крім порушень санітарно-гігієнічних і санітарно-протиепідемічних правил і норм), порушення порядку здійснення діяльності, спрямованої на штучні зміни стану атмосфери та атмосферних явищ; недодержання вимог щодо охорони атмосферного повітря при введенні в експлуатацію та експлуатації підприємств і споруд; недодержання

екологічних вимог під час проектування, розміщення, будівництва, реконструкції та прийняття в експлуатацію об'єктів або споруд; випуск в експлуатацію транспортних та інших пересувних засобів з перевищенням нормативів вмісту забруднюючих речовин у викидах; експлуатація автотранспортних та інших пересувних засобів з перевищенням нормативів вмісту забруднюючих речовин у викидах; порушення правил складування, зберігання, розміщення, транспортування, утилізації, ліквідації та використання відходів; порушення правил ведення первинного обліку та здійснення контролю за операціями поводження з відходами або неподання чи подання звітності щодо утворення, використання, знешкодження та видалення відходів; виробництво продукції з відходів чи з їх використанням без відповідної нормативно-технічної і технологічної документації; приховування, перекручення або відмова від надання повної та достовірної інформації за запитами посадових осіб і зверненнями громадян та їх об'єднань щодо безпеки утворення відходів і поводження з ними; змішування чи захоронення відходів, для утилізації яких в Україні існує відповідна технологія, без спеціального дозволу; порушення правил передачі відходів; порушення встановлених правил і режиму експлуатації установок і виробництв з оброблення та утилізації відходів; порушення правил застосування, зберігання, транспортування, знешкодження, ліквідації та захоронення пестицидів і агрохімікатів, токсичних хімічних речовин та інших препаратів (крім порушень санітарно-гігієнічних і санітарно-протиепідемічних правил і норм); експлуатація на водних об'єктах водозабірних споруд, не забезпечених рибозахисним обладнанням; порушення вимог щодо охорони середовища перебування і шляхів міграції, переселення, акліматизації та схрещування диких тварин; жорстоке поводження з тваринами (щодо диких тварин); невиконання правил і норм у процесі створення, виробництва, зберігання, транспортування, використання, знешкодження, ліквідації, захоронення мікроорганізмів, біологічно активних речовин та інших продуктів біотехнологій (крім порушень санітарно-

гігієнічних і санітарно-протиепідемічних правил і норм); невиконання вимог екологічної безпеки в процесі впровадження відкриттів, винаходів, корисних моделей, промислових зразків, раціоналізаторських пропозицій, нової техніки, технологій і систем, речовин і матеріалів; перевищення лімітів і нормативів використання природних ресурсів; приховування перевищення встановлених лімітів на обсяги утворення та розміщення відходів; порушення правил і норм з ядерної та радіаційної безпеки при використанні джерел іонізуючого випромінювання (крім порушень санітарно-гігієнічних і санітарно-протиепідемічних правил і норм). Повноваження щодо притягнення до адміністративної відповідальності мають такі органи: органи Державного комітету по земельних ресурсах України розглядають справи про адміністративні правопорушення, пов'язані з порушенням законодавства в галузі використання та охорони земель і порядку регулювання земельних відносин (ст.52-56, 188-5 КУпАП); органи Державного комітету України по водному господарству розглядають справи про адміністративні правопорушення, пов'язані з порушенням правил використання, охорони водних ресурсів (ст.48, 59, 60, 61 КУпАП); органи Департаменту геології та використання надр Міністерства екології та природних ресурсів України розглядають справи про адміністративні правопорушення у галузі геології та використання надр (ст.59, 60, 61 КУпАП); органи Державного департаменту рибного господарства України (Укрдержрибгосп) розглядають справи про адміністративні правопорушення, пов'язані з порушенням правил рибальства та охорони рибних запасів, передбачені (ст.50, 86-1, 91-2, 188-5 КУпАП); органи Державного комітету лісового господарства України (Держкомлісгоспу України) розглядають справи про адміністративні правопорушення, передбачені (ст.49, 63-70, 73, 75, 77, 188-5 КУпАП); органами мисливського господарства розглядають справи про адміністративні правопорушення, пов'язані з порушенням правил ведення мисливського господарства і полювання, передбачені ст.50, 91-2, 188-5 КУпАП; органи спеціально уповноваженого центрального органу виконавчої

влади у галузі екології та природних ресурсів України (Міністерства екології та природних ресурсів України) розглядають справи про адміністративні правопорушення, передбачені ст.47-50, 52-55, 57-74, 76-91-3, 95 (крім порушень санітарно-гігієнічних і санітарно-протиепідемічних правил і норм), 153, 188-5.

Адміністративна відповідальність у галузі екології може застосовуватись до винних осіб лише спеціально уповноваженими відповідно до законодавства органами та посадовими особами згідно з їх компетенцією і чітко визначеними повноваженнями. Так, наказом Міністерства аграрної політики України від 06.09.00 затверджені Методичні вказівки про порядок притягнення до адміністративної відповідальності порушників законодавства у сфері захисту рослин, які роз'яснюють порядок притягнення до адміністративної відповідальності посадових осіб підприємств, установ, організацій незалежно від форми власності та громадян у разі порушення ними законодавства України у сфері захисту рослин.

До кримінальної відповідальності притягуються винні особи у скоєнні злочинів, що являють собою найбільшу небезпеку для суспільства і навколишнього природного середовища. Відповідно до положень статей Кримінального кодексу України від 05.04.01, що є єдиним законодавчим документом, за яким визначаються вид і міра кримінальної відповідальності за екологічні правопорушення в Україні, зокрема у розд. VIII «Злочини проти довкілля».

Чинний Кримінальний кодекс України визначає такі види злочинних діянь у галузі екології: порушення правил екологічної безпеки (ст.236); невжиття заходів щодо ліквідації наслідків екологічного забруднення (ст.237); приховування або перекручення відомостей про екологічний стан або захворюваність населення (ст.238); забруднення або псування земель (ст.239); порушення правил охорони надр (ст.240); забруднення атмосферного повітря (ст.241); порушення правил охорони вод (ст.242); забруднення моря (ст.243); порушення законодавства про континентальний

шельф України (ст.244); знищення або пошкодження лісових масивів (ст.245); Незаконна порубка лісу (ст.246); порушення законодавства про захист рослин (ст.247); незаконне полювання (ст.248); незаконне зайняття рибним, звіриним або іншим водним добувним промислом (ст.249); проведення вибухових робіт з порушенням правил охорони рибних запасів або диких водних тварин (ст.250); порушення ветеринарних правил (ст.251); умисне знищення або пошкодження територій, взятих під охорону держави, та об'єктів природно-заповідного фонду (ст.252); проектування чи експлуатація споруд без систем захисту довкілля (ст.253); безгосподарське використання земель (ст.254); незаконне поводження з радіоактивними матеріалами (ст.265); порушення правил поводження з вибуховими, легкозаймистими та їдкими речовинами або радіоактивними матеріалами (ст.267); незаконне ввезення на територію України відходів і вторинної сировини (ст.268); жорстоке поводження з тваринами (ст.299); екоцид (ст.441).

Слід зазначити, що згідно із ст.51 Кримінального кодексу України є такі види покарань:

- 1) штраф;
- 2) позбавлення військового, спеціального звання, рангу, чину або кваліфікаційного класу;
- 3) позбавлення права обіймати певні посади або займатися певною діяльністю;
- 4) громадські роботи;
- 5) виправні роботи;
- 6) службові обмеження для військовослужбовців;
- 7) конфіскація майна;
- 8) арешт;
- 9) обмеження волі;
- 10) тримання в дисциплінарному батальйоні військовослужбовців;
- 11) позбавлення волі на певний строк;

12) довічне позбавлення волі.

Крім того, відповідно до ст.98 Кримінального кодексу України до неповнолітніх, визнаних винними у вчиненні злочину, судом можуть бути застосовані такі основні види покарань:

- 1) штраф;
- 2) громадські роботи;
- 3) виправні роботи;
- 4) арешт;
- 5) позбавлення волі на певний строк.

Вид та міра покарання залежить від ступеня суспільної небезпеки скоєного екологічного злочину і встановлюється відповідною статтею Кримінального кодексу України. До цивільної (майнової) відповідальності притягуються юридичні і фізичні особи, які внаслідок порушення екологічного законодавства зобов'язані відшкодувати заподіяну ними шкоду у повному обсязі і відповідно до реальної вартості майна на момент заподіяння збитків, а також витрат на поліпшення втрачених у результаті скоєного правопорушення властивостей природних ресурсів. Відповідно до ст.68 Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25.06.91 вжиття заходів дисциплінарної, адміністративної та кримінальної відповідальності не звільняє винних осіб від компенсації шкоди, заподіяної забрудненням навколишнього природного середовища і погіршенням стану природних об'єктів та якості природних ресурсів.

За цивільним законодавством під шкодою слід розуміти грошову оцінку негативних для порушника майнових наслідків, які тим відчутніші для нього, чим більші матеріальні і моральні втрати були спричинені через скоєне ним правопорушення. Стосовно екологічних правопорушень і застосування з приводу їх вчинення майнової відповідальності можна говорити не тільки про матеріальні (економічні) підстави - знищення, псування майна громадян і юридичних осіб (наприклад, втрат лісового масиву в результаті незаконної порубки дерев, незаконного вилову чи

потрави в результаті забруднення вод, цінних порід риб), що призводить до матеріальної шкоди. Можна говорити про матеріальну шкоду як підставу застосування майнової відповідальності у галузі екології, оскільки екологічне правопорушення - це порушення особистих немайнових прав громадян суспільства, зокрема щодо забезпечення безпечного для життя і здоров'я довкілля, охорони здоров'я, тобто прав, гарантованих Конституцією України.

Враховуючи специфіку екологічної шкоди (можливість прояву її наслідків через певні, а інколи значні проміжки часу), методика її обчислення спирається на сам факт заподіяння екологічної шкоди, а не на наслідки її прояву. Якщо така методика відсутня, то розмір шкоди розраховується на підставі фактичних затрат, необхідних для відновлення порушеного стану навколишнього природного середовища. В окремих випадках шкода може бути відшкодована шляхом покладання обов'язку на винну особу щодо відновлення стану та якості навколишнього природного середовища і його окремих об'єктів за рахунок власних коштів заподіювача шкоди, його власними силами. Оскільки в ст.440 Цивільного кодексу України від 18.07.63 зазначається, що шкода, заподіяна майну громадянина, а також шкода, заподіяна організації, підлягає відшкодуванню особою, яка заподіяла шкоду, у повному обсязі.

ВИСНОВКИ

В дипломній роботі були широко продемонстровані специфічні властивості та поведінка гранульованих матеріалів, які дозволяють запропонувати концепцію та модель захисного екрану з метою убезпечення від радіаційного опромінення.

Були розглянуті питання стосовно сучасного стану парку захисних екранів, які здібні здійснювати захисні функції від гамма випромінювань, і у більшості використовують бетонні конструкції.

Були проаналізовані технології та методи обробки, зберігання та екранування радіаційних матеріалів за допомогою гранульованих матеріалів. Показані певні недоліки сучасних монолітних бетонних конструкцій та проведено порівняння з подібними конструкціями, виконаними на базі гранульованих матеріалів (на прикладі піска та бентоніту). Проведений аналіз показав, що внаслідок того, що здобуток транспортування, монтажу та ремонтувальних робіт, які пов'язані з конструкцією та експлуатацією захисних екранів на базі гранульованих матеріалів є економічно вигіднішими в порівнянні з монолітними конструкціями.

З метою параметризації інженерних конструкцій і моделі екрану, яка базується на багатоканальній дифузії.

В дипломній роботі проаналізовані різні модельні підходи до оцінки захисних параметрів мікро-механічних екранів від багатосферних (із застосуванням закону Бугера) до багатоканальних дифузійних, а також багато центрованого розсіяння, і таким чином, розроблено наукове підґрунтя для інженерних проектів.

В дипломній роботі також досліджується економічна складова та доцільність використання гранульованих матеріалів як базового матеріалу для побудови радіаційних захисних екранів. Виконані відповідні оцінки, які показують, що витрати пов'язані з видобуванням, переробкою, транспортуванням, монтажем та іншими витратами на побудову захисних

екранів на базі гранульованих матеріалів приблизно в 3 – 4 рази менш ніж в аналогічних випадках з використання монолітних модулів захисту.

Додатково розглянуто сучасні програми співробітництва в сфері безпеки ядерних енергетичних комплексів, що існують між Україною та МАГАТЕ де в останні часи була прийнята програма по контролюванню поводження з небезпечними радіоактивними відходами, (зокрема на Конференції від 22 травня 2018 року у Відні), на якій було розглянуто питання перебудови сховищ радіоактивних відходів, на 14 атомних електростанціях на території Європи, з використанням гранульованих матеріалів.

Приведенні висновки, як фізично, так і економічно підкреслюють актуальність данної роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Атомна енергетика України. [Електроний ресурс]. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Атомная_енергетика_Украины, (дата звернення 23.09.2018) ;
2. Поводження з РАВ на АЕС. [Електроний ресурс]. Режим доступу: <http://uatom.org/index.php/uk/povodzhennya-z-radioaktyvnymy-vidhodamy-na-diyuchyh-aes/>(дата звернення 17.10.2018) ;
3. Герасимов О.І. Теоретичні основи технологій захисту навколишнього середовища: навчальний посіб. / Одеськ. держ. екол. ун-т. Одеса: ТЕС, 2018. 228 с. ;
4. Герасимов О.І. Фізика гранульованих матеріалів. Монографія/ Одеський державний екологічний університет. Одеса: ТЕС, 2015.264 с.;
5. Худинцев М.М. Методичні вказівки до видання курсових та дипломних робіт для студентів спеціальності екологія та охорона навколишнього середовища. / Одеськ. держ. екол. ун-т. Одеса: 2007 р., 20 с. ;
6. Герасимов О.І., Сомов М.М. Локальная структура гранулированных материалов. / Одеськ. держ. екол. ун-т. Одеса: Вісник ОДЕКУ. 2010 р. вип.10. 304 с. ;
7. Заславкий Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику. От маятника до турбулентности и хаоса. Москва: Наука, 1986. 544 с. ;
8. Урьев Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов. М.:Химия, 1988. 453 с. ;
9. Урьев Н.Б., Потанин А.А. Текучесть суспензий и порошков. М.: Химия, 1992. 323 с.;
10. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Москва: Наука, 1973. 714 с.;
11. Герасимов О.І., Худинцев М.М, Андріанова І.С., Співак А.Я. Гранульовані матеріали в технологіях утилізації радіаційно шкідливих речовин. // Проблеми та перспективи формування Стратегії

- поводження з небезпечними відходами в Україні: законодавство, економіка, технології / К.: Центр екологічної освіти та інформації, 2016. С. 40-42;
12. Шевцов А., Земляний М., Дорошкевич А. Проблема відпрацьованого ядерного палива: світові тенденції та українські реалії. [Електроний ресурс]. Режим доступу: <http://bld.niss.gbv.ua/Mbnitbr/august08/18.htm>, (дата звернення 02.11.2018);
 13. Не фінансовий звіт ДП «НАЕК «Енергоатом», розділ «Екологічна відповідальність». [Електроний ресурс]. Режим доступу: <http://nfr.energoatom.kiev.ua/ua/ecology.php>, (дата звернення 17.10.2018);
 14. Бекман І.М. Радіохімічна переробка ядерного палива. [Електроний ресурс]. Режим доступу: http://profbeckman.narod.ru/RN0.files/26_6.pdf, (дата звернення 17.11.2018);
 15. Герасимов О.І., Кільян А.М., Андріанова І.С., Курятников В.В., Співак А.Я. Технології дезактивації радіаційних забруднень за допомогою новітніх матеріалів: адсорбція у графенових матрицях. // Матеріали НАЦІОНАЛЬНОГО ФОРУМУ «Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології» (22-23 листопада 2018, м. Київ), 8стор.