

Національний університет "Чернігівський колегіум" імені Т.Г.Шевченка

Природничо-математичний факультет

Кафедра хімії, технологій та фармації

Кваліфікаційна робота

освітній ступінь: магістр

на тему

Поводження з радіоактивними відходами ЧАЕС

Виконав:

студент __6__ курсу, групи _62_____

спеціальності 102 Хімія
(шифр і назва спеціальності)


_____ Калита О. М. _____
(прізвище та ініціали)


Керівник: професор, д.т.н., завідувач
кафедри хімії, технологій та фармації


Курмакова І.М.
(прізвище та ініціали)

Чернігів – 2023

Роботу подано до розгляду « 09 » 01 2024 року.


Студент  Кашута О.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник  Курмакова Т.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент  Мехид О.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Кваліфікаційну роботу (проект) розглянуто на засіданні кафедри хімії, технологій та фармації. Протокол № 8 від « 10 » січня 2024 року.

Студент допускається до захисту даної роботи в екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри  Курмакова Т.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП	6
РЕФЕРАТ.....	4
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
РОЗДІЛ 1. Джерела та класифікація радіоактивних відходів.....	8
1.1. Радіоактивні матеріали та радіоактивні відходи	8
1.2. Основні джерела радіоактивних відходів	10
1.3. Вторинні (додаткові) джерела утворення радіоактивних відходів	12
1.4. Класифікація радіоактивних відходів	14
РОЗДІЛ 2. Практика поводження з радіоактивними відходами в Україні та світі	24
2.1. Практика поводження з радіоактивними відходами у світі	24
2.2. Практика поводження з радіоактивними відходами в Україні	27
РОЗДІЛ 3. Перспективні схеми кондиціювання рідких радіоактивних відходів	32
3.1. Застосування іммобілізації для забезпечення безпечного зберігання рідких радіоактивних відходів	32
3.2. Розробка нових методів для ефективної очистки рідких радіоактивних відходів	35
РОЗДІЛ 4. Об'єкти та методи дослідження	40
4.1. Об'єкти дослідження	40
4.2. Фізико-хімічні методи дослідження радіоактивної води	41
4.3. Оцінка ефективності очищення води на спеціальній установці водоочищення СВО-4	45
РОЗДІЛ 5. Поводження з радіоактивними відходами ЧАЕС	47
5.1. Поводження з радіоактивними водами на ЧАЕС	49
5.2. Тверді радіоактивні відходи та поводження з ними	57
ВИСНОВКИ	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	63
ДОДАТКИ	70

РЕФЕРАТ

В роботі здійснено огляд радіоактивних матеріалів і відходів, дано визначення первинних джерел і розглянута класифікація таких відходів. Також розглядаються вторинні джерела утворення радіоактивних відходів, закладаючи основу для поглибленого розуміння різноманітної природи цих матеріалів.

У розділі 2 розглянути практичні аспекти поводження з радіоактивними відходами як у глобальному, так і в українському контексті. Здійснено порівняльний аналіз світової практики і розглянуто специфічний підхід України до поводження з радіоактивними відходами. Цей розділ служить основою для наступних розділів, пропонуючи широкий погляд на існуючі методології.

У розділі 3 розглядаються перспективні схеми кондиціонування рідких радіоактивних відходів. Обговорюється застосування методів іммобілізації для безпечного зберігання та розробка інноваційних методів окислення та фільтрації для ефективного очищення. Ці перспективні схеми є життєво важливими компонентами для підвищення безпеки та ефективності поводження з рідкими радіоактивними відходами.

У розділі 4 наведена характеристика об'єктів та методів дослідження.

У 5 розділі проаналізована система поводження з відходами, яка реалізується на Чорнобильській АЕС. Розглядаються особливості стандартів поводження як з рідкими, так і з твердими радіоактивними відходами на ЧАЕС. Детальний аналіз практик поводження з рідкими та твердими радіоактивними відходами, характерними для Чорнобильської зони, дає критичне розуміння проблем і досягнень у цій галузі.

Огляд літератури налічує 60 інформаційних джерела. Загальний обсяг роботи 70 сторінок.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АЕС – атомна електростанція
- ВАВ – високоактивні відходи
- ВПр – відходи проміжного рівня
- ДНАВ – дуже низько активні відходи
- ДСП – державне спеціалізоване підприємство
- ЄС – Європейський союз
- ЄК – Європейська комісія
- ЕWC – Європейська система класифікації відходів
- КПВ (WAC) – критерій прийняття відходів критерії прийнятності відходів
- КТЗ – контейнер транспортний захисний
- МАГАТЕ – міжнародне агентство з атомної енергії
- НАВ – низько активні відходи
- НСА – низько і середньоактивні відходи
- ПЕД – потужність еквівалентної дози
- ПЗРВ – пункт захоронення радіоактивних відходів
- ПШТРВ – пункт прийому твердих радіоактивних відходів
- РАВ – радіоактивні відходи
- РК – радіаційний контроль
- РМП – радіоактивні матеріали природного походження
- РМ – радіоактивні матеріали
- САВ – середньо активні відходи
- САТ – спецавтотранспорт
- СВО – спеціальне водоочищення
- ТУВ – трансуранові відходи
- ТРВ – тверді радіоактивні відходи
- ЧАЕС – Чорнобильська атомна електрична станція
- ЦСВЯП – централізоване сховище відпрацьованого ядерного палива

ВСТУП

Актуальність роботи. Під час аварії на Чорнобильській атомній електростанції (ЧАЕС) в атмосферу було викинуто до 100 % радіоактивних благородних газів, 20-50 % ізотопів Йоду, 12...30 % ^{134}Cs , ^{137}Cs і 3-4 % менш летких радіонуклідів (^{95}Zr , ^{99}Mo , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{154}Eu , ^{155}Eu , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu та ін.) від їх вмісту в реакторі на момент аварії [1]. Метеорологічні умови під час викидів радіоактивних матеріалів із реактора зумовили складну картину забруднення значних територій в Україні, Білорусії та у багатьох країнах Європи. На території України найбільші екологічні наслідки мали райони проходження західного (охоплено Київську, Житомирську області, північ Рівненської та північно-східну частину Волинської області), південного (забруднено радіонуклідами Київську, Черкаську, Кіровоградську, частково Вінницьку, Одеську та Миколаївську області) і східного (Чернігівська, північ Сумської області, частини Донецької, Луганської і Харківської областей) радіоактивних слідів [2]. Діяльність ЧАЕС, як об'єкту енергетики, було призупинено [3] та створено Чорнобильський біосферний заповідник [4]. Основні завдання Заповідника: мінімізація екологічної небезпеки та збереження природних багатств зони відчуження; відтворення та збереження природних екосистем; підтримання загального екологічного балансу; забезпечення охорони території Заповідника з усіма природними об'єктами тощо [4].

На сьогоднішній день ЧАЕС є об'єктом на якому накопичена значна кількість радіоактивних відходів, що потребує постійного моніторингу та досліджень наслідків на навколишнє середовище [5]. Актуальним також є удосконалення методів поводження з радіоактивними відходами та їх утилізації з максимальною безпекою для здоров'я людини та природи.

Метою роботи є вивчення системи поводження з радіоактивними відходами на Чорнобильській атомній електростанції та оцінка ефективності технології очищення радіоактивної води від катіонів та аніонів, що використовується на ЧАЕС.

Завдання роботи:

- 1) дослідити проблему утворення радіоактивних відходів, з'ясувати підходи до їх класифікації та особливості поводження з ними;
- 2) проаналізувати можливості та перспективи використання різних методів утилізації радіоактивних відходів;
- 3) з'ясувати особливості поводження з рідкими та твердими радіоактивними відходами ЧАЕС;
- 4) визначити ефективність технології очищення рідких радіоактивних відходів від катіонів та аніонів на відповідних етапах технологічного процесу.

Об'єктом дослідження є поводження з радіоактивними відходами ЧАЕС.

Предметом дослідження є радіоактивні відходи ЧАЕС.

Методи дослідження: аналіз інформативних джерел за тематикою дослідження (підручники, наукові видання та статті, Інтернет джерела), спостереження, порівняльний аналіз, фізико-хімічні методи аналізу.

Наукова новизна полягає у дослідженні сучасного стану поводження з радіоактивними відходами на ЧАЕС, зокрема оцінці ефективності очищення радіоактивних рідких відходів від катіонів та аніонів на відповідних стадіях технологічного процесу.

Апробація роботи з публікацією частини матеріалів здійснена на Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю студентів, аспірантів і молодих вчених «Крок у науку: дослідження у галузі природничо-математичних дисциплін та методик їх навчання» (7 грудня 2023 року).

РОЗДІЛ 1

Джерела утворення радіоактивних відходів

1.1. Радіоактивні матеріали та радіоактивні відходи

В літературних джерелах існує декілька визначень радіоактивних речовин. Згідно [6], радіоактивні речовини – це речовини, що випускають іонізуюче випромінювання, яке може бути шкідливим для живих організмів. Вони використовуються в медицині, промисловості, виробництві електроенергії та у наукових дослідженнях.

Радіоактивні матеріали – це будь-які матеріали, що містять радіонукліди і для яких питома активність та сумарна активність проби перевищують межі, встановлені нормами, правилами та стандартами з ядерної та радіаційної безпеки [7]. Вони містять речовини з нестабільними атомними ядрами, які піддаються розпаду і випромінюють випромінювання у вигляді альфа-, бета- і гамма-променів.

Радіоактивні матеріали можуть бути природного або штучного походження. Прикладами радіоактивних матеріалів природного походження є уран, торій і радій. Штучно отримані радіоактивні матеріали включають ізотопи, які використовуються в медичній діагностиці та лікуванні [8], виробництві ядерної енергії та наукових дослідженнях.

Використання радіоактивних матеріалів – це застосування їх у різних сферах: від протипожежних датчиків до терапії злоякісних ракових пухлин. Зокрема, у медицині радіоактивні матеріали використовують для діагностичної візуалізації та лікування раку. У діагностичній візуалізації для виявлення і локалізації відхилень в організмі використовують ізотопи, що випромінюють гамма-промені. Під час лікування раку використовується високоенергетичне випромінювання для знищення ракових клітин [8]. Також радіація допомагає візуалізувати кістки, м'які тканини легень, уражені ділянки мозку і т.п.

У промисловості радіоактивні матеріали використовують для вимірювання товщини матеріалів, виявлення витоків на трубах і стерилізації медичного обладнання у великих об'ємах. У виробництві енергії їх використовують на атомних електростанціях. У наукових дослідженнях радіоактивні матеріали використовуються для вивчення властивостей матеріалів і біологічних систем, встановлення археологічного віку природних об'єктів (рис. 1.1), в лабораторії - для дослідження їх витривалості та стійкості в екстремальних умовах (наприклад, методом *in vitro*).

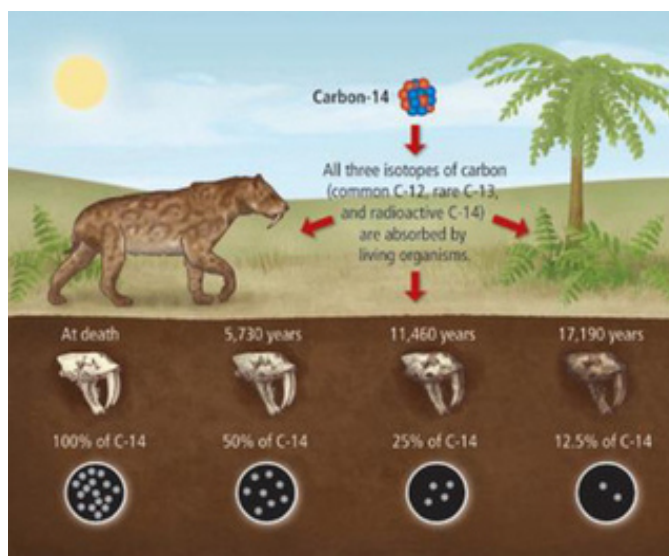


Рис. 1.1. Використання радіоактивних ізотопів для встановлення археологічного віку природних об'єктів

Використання радіоактивних речовин та матеріалів регулюється нормативними актами та законами, в тому числі, для забезпечення безпечного поводження з ними, транспортування, зберігання та утилізації [9].

Радіоактивні відходи (рис. 1.2) – це відходи, що утворюються в результаті використання радіоактивних матеріалів. Вони поділяються на низькорівневі відходи, відходи проміжного рівня і високорівневі відходи. Низькорівневі відходи включають матеріали, які містять невелику кількість радіоактивних речовин і можуть бути утилізовані на полігонах. Відходи проміжного рівня включають матеріали, які містять більш високі рівні радіоактивних матеріалів і потребують спеціального поводження та захоронення. Високоактивні відходи

включають матеріали, які є високорадіоактивними і потребують довгострокового зберігання та захоронення в геологічному сховищі [8].



Рис. 1.2. Радіоактивні відходи

Поводження з радіоактивними відходами та їхнє захоронення регулюються для забезпечення захисту здоров'я людини та довкілля. Поводження з радіоактивними відходами включає їх обробку, транспортування, зберігання та захоронення.

1.2. Основні джерела радіоактивних відходів

Радіоактивні відходи являють собою значну небезпеку для довкілля та здоров'я людей, тож потребують належного управління для захисту здоров'я людини та довкілля. Основними джерелами радіоактивних відходів є виробництво ядерної енергії, ядерна медицина та промислова діяльність. Ці джерела продукують відходи, які є високорадіоактивними і можуть залишатися небезпечними протягом тисяч років.

Радіоактивними відходами в першу чергу стає відпрацьоване ядерне паливо - небезпечний побічний продукт виробництва ядерної енергії, також відходи ядерної медицини та інших видів промислової діяльності, в яких використовуються радіоактивні матеріали [10]. Вони являють собою серйозну

екологічну проблему, оскільки залишаються небезпечними протягом тисяч років і можуть викликати серйозні проблеми зі здоров'ям, якщо з ними не поводитися належним чином.

Робота атомних електростанцій супроводжується утворенням радіоактивних відходів високого рівня, які є продуктом поділу урану або плутонію в ядерних реакторах. Ці відходи високорадіоактивні і містять тривало живучі ізотопи, такі як цезій-137 і стронцій-90, які можуть залишатися небезпечними протягом тисяч років.

Ядерна медицина - ще одне джерело радіоактивних відходів, які утворюються під час таких медичних процедур, як рентгенівське випромінювання, комп'ютерна томографія та радіотерапія (рис. 1.3). Хоча кількість радіоактивних відходів, що утворюються в ядерній медицині, відносно невелика, вони можуть становити небезпеку для здоров'я людини і навколишнього середовища, за умови неналежної утилізації.



Рис. 1.3. Апарат ELESTA для проведення радіойодтерапії

Промислова діяльність, така як буріння нафтових і газових свердловин, видобуток корисних копалин і виробництво ядерної зброї, також призводить до утворення радіоактивних відходів. Наприклад, під час видобутку нафти і газу можуть утворюватися радіоактивні матеріали природного походження (РМП), які зазвичай знаходяться в гірських породах, що містять нафту і газ. До них належить, наприклад, такий газ як радон-222.

Ізотопи, що входять до складу радіоактивних відходів, мають різні періоди напіврозпаду (час, необхідний для того, щоб половина радіоактивного матеріалу розпалася в нерадіоактивну форму). Вони фактично визначають, як довго відходи залишатимуться небезпечними. Наприклад, період напіврозпаду цезію-137 становить 30 років, що вказує на те, що він буде залишатися радіоактивним протягом десятиліть.

У наслідок ядерних аварій, зокрема Чорнобильської катастрофи, непридатними стають сотні квадратних кілометрів території. Безліч речей і будівель (які не були призначені для обігу радіоактивних матеріалів) перетворились на радіоактивні відходи [11].

1.3. Вторинні (додаткові) джерела утворення радіоактивних відходів

Первинними джерелами радіоактивних відходів є підприємства ядерного паливного циклу та атомні електростанції, на яких утворюються високоактивні відходи. Однак існують і вторинні джерела утворення радіоактивних відходів, які також можуть становити значний ризик для довкілля та здоров'я населення, якщо ними не управляти належним чином. Зокрема, радіоактивні відходи утворюють при використанні радіоактивних матеріалів. Розрізняють так звані «супровідні матеріали» - тара, в якій транспортуються небезпечні залишки ядерної промисловості, рідини, які охолоджують відпрацьоване та активне ядерне паливо і т.д.

Вторинні радіоактивні відходи – це також відходи, які утворюються в процесі виконання робіт з використання, транспортування та видалення відходів атомної промисловості з місць накопичення і підготовці їх до зберігання. Ці відходи не мають практичної цінності і потребують спеціальної повторної утилізації, захоронення, створення сховища [12]. Вони є одним з видів небезпечних відходів, і виділені в окрему групу (відходи поділяються на токсичні, біологічні, вибухонебезпечні, вогненебезпечні і радіоактивні).

Україна має власне законодавство і стратегії, які регулюють поводження з радіоактивними відходами [13].

Джерела утворення вторинних радіоактивних відходів [14]:

1) Медичні установи, зокрема в яких використовують радіоактивні матеріали в діагностичних і терапевтичних цілях. Радіоактивні ізотопи застосовуються для медичної візуалізації, лікування раку та інших медичних процедур. Радіоактивні медичні відходи становлять значну частку вторинних радіоактивних відходів. До таких відходів належать використані голки, шприци та інше одноразове медичне обладнання, що містить радіоактивні ізотопи або контактує з ним. Неправильна утилізація цих відходів може становити значний ризик для здоров'я населення і навколишнього середовища.

2) Промисловість. Радіоактивні матеріали використовуються в різних галузях промисловості, в тому числі для проведення розвідки запасів нафти і газу, для виробництва металів, опромінення продуктів харчування, видобування електроенергії (атомні електростанції). Наприклад, під час розвідки нафти і газу та виробництва металів можуть утворюватися радіоактивні окалини та шлами. Радіоактивні відходи, що утворюються в цих галузях, можуть бути значним джерелом вторинних радіоактивних відходів.

3) Науково-дослідні установи, включно з закладами вищої освіти, використовують радіоактивні ізотопи для широкого спектра дослідницьких цілей. Радіоактивні відходи, що утворюються в цих установах, також можуть бути значним джерелом вторинних радіоактивних відходів. До таких відходів належать забруднене лабораторне обладнання, забруднені туші тварин та інші радіоактивні відходи, що утворюються під час досліджень.

Під час виведення з експлуатації ядерних установок, дослідницьких реакторів може утворюватися значна кількість як первинних, так і вторинних радіоактивних відходів. Ці відходи включають забруднене обладнання та конструкції, а також радіоактивні матеріали, які більше не потрібні.

4) Ядерні аварії. Унаслідок ядерних аварій, таких як Чорнобильська катастрофа в 1986 році [5] та Фукусімська катастрофа в 2011 році, утворилися значні обсяги радіоактивних відходів. Наслідки цих аварій для довкілля і здоров'я можуть бути далекосяжними і довготривалими.

5) Радіоактивні матеріали використовують у військових цілях, включно з виробництвом ядерної зброї та випробуванням ядерних пристроїв. Радіоактивні відходи, що утворюються в результаті цієї діяльності, можуть бути значним джерелом вторинних радіоактивних відходів.

6) Споживчі товари такі як детектори диму, циферблати годинників, що світяться, і покажчики виходу, також можуть містити радіоактивні матеріали. Під час утилізації цих товарів можуть утворюватися радіоактивні відходи.

Вплив вторинних радіоактивних відходів залежить від типу відходів і рівня їхньої радіоактивності. Вплив радіоактивних матеріалів може спричинити цілу низку наслідків для здоров'я, включно з раком, генетичними ушкодженнями та іншими захворюваннями, пов'язаними з радіацією. Крім того, радіоактивні відходи можуть забруднювати ґрунт, повітря і воду, що призводить до деградації довкілля і потенційного впливу на біорізноманіття.

Утворення вторинних радіоактивних відходів є серйозною проблемою для довкілля і здоров'я населення. Медичні установи, промислові підприємства, науково-дослідні установи, виведення з експлуатації ядерних об'єктів, ядерні аварії, військове застосування та споживчі товари є одними з основних джерел вторинних радіоактивних відходів. Правильне управління та утилізація цих вторинних відходів необхідна для мінімізації потенційного впливу на навколишнє середовище та здоров'я населення.

1.4. Класифікація радіоактивних відходів

Радіоактивні відходи є одним із найнебезпечніших побічних продуктів ядерних технологій [14]. Їх класифікація важлива для утилізації, що має важливе значення для забезпечення здоров'я населення та захисту довкілля.

Аналіз літературних джерел показав [15-18], що у різних країнах прийнята власна класифікація радіоактивних відходів.

1.4.1. Класифікація радіоактивних відходів США. У Сполучених Штатах Америки створено комплексну систему класифікації та утилізації радіоактивних відходів, яка заснована на потенційних ризиках, пов'язаних із цими відходами. Американська класифікація радіоактивних відходів ґрунтується на рекомендаціях Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) і покликана забезпечити безпечне зберігання, транспортування та утилізацію радіоактивних відходів [15, 16].

Класифікація радіоактивних відходів у США ґрунтується на кількох факторах, включно з джерелом відходів, їхніми фізичними та хімічними властивостями, а також потенційною небезпекою для здоров'я людини і навколишнього середовища. Комісія з ядерного регулювання США (NRC USA) встановила чотирирівневу систему класифікації радіоактивних відходів, яка включає в себе [15]:

Відходи класу А: у цю категорію входять радіоактивні відходи, які мають найнижчий рівень радіоактивності та становлять найменшу потенційну небезпеку для здоров'я людини і навколишнього середовища. Відходи класу А зазвичай включають такі предмети, як забруднений одяг, інструменти та лабораторне обладнання, і зазвичай утилізуються на полігонах, призначених для зберігання низькоактивних радіоактивних відходів.

Відходи класу В: до цієї категорії входять радіоактивні відходи, які мають вищий рівень радіоактивності, ніж відходи класу А. Вони становлять більшу потенційну небезпеку для здоров'я людини та навколишнього середовища. Відходи класу В зазвичай включають такі матеріали, як теплоносій реактора, і зазвичай захоронюються на спеціалізованих полігонах, призначених для зберігання радіоактивних відходів середнього рівня.

Відходи класу С: у цю категорію входять радіоактивні відходи, що мають найвищий рівень радіоактивності та становлять найбільшу потенційну небезпеку для здоров'я людини і навколишнього середовища. Відходи класу С

зазвичай включають відпрацьоване ядерне паливо та інші високорадіоактивні матеріали, які зазвичай зберігаються на території атомних електростанцій доти, доки не з'явиться постійний пункт захоронення [17].

Трансуранові відходи (ТУВ): до цієї категорії входять радіоактивні відходи, що містять елементи, атомний номер яких більший, ніж в урану, наприклад, плутоній. Трансуранові відходи зазвичай утворюються в результаті виробництва ядерної зброї та дослідницької діяльності і захоронюються на спеціальному об'єкті, відомому як Пілотна установка з ізоляції відходів у Нью-Мексико.

На класифікацію радіоактивних відходів у США також впливає роль федерального уряду в регулюванні ядерної енергетики та поводження з відходами. NRC USA здійснює нагляд за класифікацією та регулюванням комерційних атомних електростанцій, а Міністерство енергетики відповідає за поводження з радіоактивними відходами, що утворюються в результаті виробництва ядерної зброї та дослідницької діяльності.

Поводження та утилізація радіоактивних відходів у США регулюється різними федеральними законами і законами штатів, включно із Законом про атомну енергію 1954 року, Законом про політику в галузі ядерних відходів 1982 року і Законом про політику в галузі низькоактивних радіоактивних відходів 1980 року. Ці закони створюють основу для безпечного поводження, зберігання, транспортування і поховання радіоактивних відходів і вимагають від підприємств дотримання суворих правил для забезпечення охорони здоров'я населення і навколишнього середовища.

На додаток до федеральних норм багато штатів встановили свої власні правила поводження з радіоактивними відходами та їх захоронення. Ці правила можуть бути суворішими, ніж федеральні, і можуть включати вимоги щодо екологічного моніторингу, повідомлення громадськості та вибору місця.

Поводження з радіоактивними відходами в Сполучених Штатах зазвичай включає в себе поєднання зберігання на місці, транспортування і захоронення. Низькоактивні радіоактивні відходи часто захоронюються на полігонах, які

призначені для утримання відходів і запобігання забрудненню навколишнього середовища. Радіоактивні відходи середнього рівня зазвичай зберігаються на території атомних електростанцій доти, доки не з'явиться постійний об'єкт для захоронення, а радіоактивні відходи високого рівня зберігаються в безпечних об'єктах на місці або в спеціальних сховищах, таких як пропонуване сховище Юкка Маунтін у Неваді. США у загальному плані має п'ять об'єктів із захоронення радіоактивних відходів: Техаський компактний об'єкт поблизу кордону з Нью-Мексико, який експлуатується компанією Waste Control Specialists; Барнуелл, Південна Кароліна; Клайв, Юта; Ок-Рідж, Теннессі - всі експлуатуються компанією Energy Solutions; і Річленд, Вашингтон - експлуатується American Ecology Corporation [16].

Американська класифікація радіоактивних відходів є дуже важливою, оскільки визначає правила для захисту здоров'я та безпеки населення та навколишнього середовища, які використовуються як зразок і не лише в США. Правила вимагають поступово більшого контролю, оскільки зі збільшенням класу відходів підвищується небезпека. Класифікація радіоактивних відходів також визначає метод утилізації. Наприклад, ядерні відходи високого рівня залишаються високорадіоактивними протягом десятків тисяч років і повинні бути утилізовані таким чином, щоб їх можна було надійно ізолювати протягом тривалого періоду часу.

На закінчення слід зазначити, що американська класифікація радіоактивних відходів є важливим аспектом програми поводження з ядерними відходами в країні. Чинна система ґрунтується на потенційному ризику, який являють собою відходи, і враховує цілу низку чинників для забезпечення належної утилізації радіоактивних відходів у спосіб, що захищає здоров'я людини та навколишнє середовище. Незважаючи на тривалі дебати навколо утилізації високоактивних відходів, очевидно, що всеосяжна й ефективна система класифікації та поводження з радіоактивними відходами необхідна для подальшого безпечного використання ядерної енергії в США і в усьому світі.

1.4.2. Класифікація відходів прийнята в ЄС та країнах Європи. Європейський союз розробив всеосяжну систему поводження з радіоактивними відходами, включно з їхньою класифікацією [18]. Мета цього звіту - представити огляд європейської класифікації радіоактивних відходів.

ЄС розробив систему класифікації радіоактивних відходів, що ґрунтується на їх радіологічних властивостях і рівні ризику, який вони становлять для здоров'я людини та довкілля. Ця система класифікації відома як Європейська система класифікації відходів (EWC). Система EWC заснована на системі класифікації Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) і використовується всіма країнами-членами ЄС [18].

Система EWC класифікує радіоактивні відходи за трьома категоріями.

Низькоактивні відходи (НАВ) - це найменш радіоактивна категорія радіоактивних відходів. До них належать такі предмети, як забруднений одяг, інструменти та обладнання, що використовуються на атомних електростанціях, у медичних установах і дослідницьких лабораторіях (фактично їх можна називати вторинними РАВ). РАВ містять радіоактивні ізотопи, які мають відносно короткий період напіврозпаду і низьку питому активність. Ці характеристики означають, що РАВ не вимагають дуже суворої ізоляції і можуть бути безпечно поховані в приповерхневих сховищах.

Відходи проміжного рівня (ВПУ) більш радіоактивні, ніж НАВ, і мають більш високу питому активність. Вони включають такі матеріали, як компоненти реакторів, забруднені метали та смоли, що використовуються для очищення води на атомних електростанціях. ВПУ містять ізотопи, що мають триваліший період напіврозпаду і потребують ретельнішого поводження, ніж НАВ. Вони мають зберігатися в інженерних спорудах, розроблених для забезпечення довгострокової ізоляції.

Високоактивні відходи (ВАВ) - це найбільш радіоактивна і небезпечна категорія радіоактивних відходів. Вона охоплює відпрацьоване ядерне паливо і відходи, що утворюються під час переробки відпрацьованого палива. ВАВ мають дуже великий період напіврозпаду і вимагають найсуворіших заходів з

локалізації. Вони мають зберігатися в глибоких геологічних сховищах, призначених для запобігання викиду радіоактивних матеріалів у навколишнє середовище.

ЄС розробив критерії прийнятності відходів (КПВ або WAC) для забезпечення безпеки та екологічно безпечного поводження з радіоактивними відходами. КПВ застосовуються до всіх видів радіоактивних відходів і охоплюють як технічні, так і адміністративні вимоги для безпечного поводження з радіоактивними відходами [19].

WAC включає вимоги до визначення характеристик і класифікації радіоактивних відходів. Також регламентується пакування, транспортування та захоронення радіоактивних відходів. Окремі вимоги висуваються до моніторингу, ведення обліку та звітності про діяльність з поводження з радіоактивними відходами.

Французька система класифікації радіоактивних відходів базується на критеріях, що враховують рівень радіоактивності та період напіврозпаду, основних радіоактивних елементів, що входять до складу відходів. На основі цих двох критеріїв Французьке національне агентство з управління радіоактивними відходами (ANDRA) визначило п'ять класів відходів, які підлягають управлінню.

У Великій Британії, як країна Європи, близько 94% радіоактивних відходів класифікують як низькорівневі відходи (LLW), близько 6% - відходи проміжного рівня (ILW), а менше 0,03% класифікують як HLW [20].

В Європейському Союзі існує нормативна база для поводження з радіоактивними відходами. Основним регулюючим органом, відповідальним за нагляд за поводженням з радіоактивними відходами, є Європейська Комісія (ЄК). Вона відповідає за розроблення законодавства і політику в галузі поводження з радіоактивними відходами, а також за моніторинг реалізації цієї політики державами членами ЄС. Один з головних документів - це ДИРЕКТИВА РАДИ щодо поводження з відпрацьованим паливом і радіоактивними відходами [21].

Крім Європейської Комісії, у кожній державі - учасниці ЄС є регулюючий орган, який відповідає за нагляд за поводженням з радіоактивними відходами в межах її кордонів. Ці регулювальні органи працюють разом, щоб забезпечити безпечне поводження з радіоактивними відходами відповідно до норм Європейського Союзу.

Європейська класифікація радіоактивних відходів ґрунтується на радіологічних властивостях відходів і рівні ризику, який вони становлять для здоров'я людини і навколишнього середовища. Система класифікації включає низькорівневі відходи, відходи проміжного рівня і високорівневі відходи. Кожна категорія відходів вимагає різних заходів з локалізації та управління.

ЄС розробив критерії прийнятності відходів для забезпечення безпечного та екологічно безпечного поводження з радіоактивними відходами. Наявна нормативно-правова база забезпечує поводження з радіоактивними відходами відповідно до норм Європейського Союзу [22].

Важливо відзначити, що класифікація радіоактивних відходів може відрізнятися в залежності від країни або організації, і що деякі відходи можуть потрапляти в кілька категорій залежно від її характеристик.

Загалом, Європейський Союз розробив комплексну систему поводження з радіоактивними відходами, в якій пріоритетна увага приділяється безпеці та охороні довкілля. Важливо відзначити, що класифікація радіоактивних відходів необхідна для забезпечення належного поводження з радіоактивними відходами, зокрема відповідно до виду, обсягу та ризиків.

1.4.3. Класифікація радіоактивних відходів, що використовується в Україні. Україна, як країна з доволі розвинутою атомною промисловістю, прийняла власну систему класифікації радіоактивних відходів та використовує деякі правові акти Європейського Союзу [23].

В Україні прийнята система класифікації радіоактивних відходів, заснована на системі класифікації МАГАТЕ. Ця система класифікує радіоактивні відходи на п'ять категорій на основі концентрації радіонуклідів та їх фізико-хімічних властивостей [24].

До цих категорій належать:

- Низькоактивні відходи (НАВ)
- Відходи проміжного рівня (ВПР)
- Високоактивні відходи (ВАВ)
- Трансуранові відходи (ТУВ)
- Дуже низькоактивні відходи (ДНАВ)

Дуже низькоактивні відходи (ДНАВ) - це радіоактивні відходи, які мають низьку концентрацію радіоактивних матеріалів і відносно швидко розпадаються. До цього типу відходів належать такі предмети, як забруднений одяг, інструменти та обладнання. ДНАВ мають низький потенціал заподіяння шкоди людям і навколишньому середовищу і можуть бути утилізовані на полігонах або перероблені. ДНАВ можна віднести до вторинних радіоактивних відходів, адже вони не є радіоактивними матеріалами.

Низькоактивні відходи (НАВ) - це радіоактивні відходи, концентрація радіоактивних матеріалів у яких вища, ніж дуже низько активних відходів. До НАВ належать такі предмети, як забруднені матеріали з ядерних установок, включно з бетоном, ґрунтом і металами. НАВ можуть бути захороненні на полігонах, приповерхневих могильниках або спалені.

Відходи проміжного рівня (ВПР) - це радіоактивні відходи, концентрація радіоактивних матеріалів у яких вища, ніж у НАВ, але нижча, ніж у ВАВ. ВПР включають такі елементи, як використані паливні елементи і компоненти реактора. ВПР вимагають більш суворих заходів щодо поводження та захоронення, таких як захоронення в глибоких геологічних сховищах або поверхневих сховищах.

Високоактивні відходи (ВАВ) є найбільш радіоактивними відходами і мають найвищу концентрацію радіонуклідів. ВАВ утворюються в результаті діяльності з переробки відпрацьованого ядерного палива. Через високу радіоактивність ВАВ потребують спеціальних заходів щодо поводження та захоронення. Найпоширенішим методом захоронення ВАВ є глибокі геологічні сховища.

Трансуранові відходи (ТУВ) - це радіоактивні відходи, що містять елементи важчі за уран. ТУВ утворюються в процесі виробництва ядерної зброї, виробництва ядерної енергії та дослідницької діяльності. Вони вимагають спеціальних заходів щодо поводження та захоронення, таких як захоронення в глибоких геологічних сховищах або на приповерхневих об'єктах захоронення.

В Україні розвинена атомна промисловість, є чотири діючі атомні електростанції та значна кількість ядерних дослідницьких і промислових об'єктів. За даними Державного агентства з управління зоною відчуження, станом на 2021 рік в Україні утворилося близько 1,7 мільйона кубічних метрів радіоактивних відходів.

Система поводження з радіоактивними відходами в Україні регулюється Законом України "Про поводження з радіоактивними відходами" [25] та підзаконними актами. Ця система відповідає за безпечне поводження, транспортування, зберігання та захоронення радіоактивних відходів.

Система поводження з радіоактивними відходами в Україні має такі цілі:

- звести до мінімуму утворення радіоактивних відходів;
- забезпечити безпечне поводження з радіоактивними відходами;
- захист здоров'я людей і довкілля від потенційних небезпек, пов'язаних із радіоактивними відходами;
- підтримання всеосяжної та прозорої системи поводження з радіоактивними відходами.

У 1995 році в Україні було ухвалено Закон «Про поводження з радіоактивними відходами» [25], який визначає обов'язки уряду щодо поводження з радіоактивними відходами та містить рекомендації щодо практики поводження з радіоактивними відходами. Закон вимагає розроблення національної програми поводження з радіоактивними відходами, яка включає створення централізованого сховища для відходів класу Б. Даний нормативно-правовий акт є дійсним і сьогодні [25].

Слід також зазначити, що класифікація радіоактивних відходів в Україні є аналогічною багатьом іншим країнам і заснована на системі класифікації

МАГАТЕ. Практика поводження з радіоактивними відходами в країні регулюється Законом про поводження з радіоактивними відходами, і уряд активно працює над створенням постійного сховища для відходів класу С, т.т. радіоактивних відходів, що мають найвищий рівень радіоактивності та становлять найбільшу потенційну небезпеку для здоров'я людини і навколишнього середовища.

РОЗДІЛ 2

Практика поводження з радіоактивними відходами в Україні та світі

2.1. Практика поводження з радіоактивними відходами у світі

Радіоактивні матеріали широко використовуються в медицині, сільському господарстві, дослідженнях, виробництві, неруйнівному контролю та розвідці корисних копалин. Радіоактивні відходи не є унікальними лише для ядерного паливного циклу. Не залежно від походження вони суворо регулюються для забезпечення гарантування відсутності наслідків пов'язаних з забрудненням навколишнього середовища. При цьому рівень небезпеки всіх радіоактивних відходів та їх радіоактивності з часом зменшується [26].

Процедура поводження з радіоактивними матеріалами базується на наступних поняттях:

- *радіоактивний розпад*. Цей процес забезпечує зниження радіоактивності ізотопів з часом. При цьому періодом напіврозпаду радіоактивного матеріалу називають час, за який половина атомів радіоізотопу розпадається, випромінюючи альфа-частинку, електрон або гама-квант.

- *зберігання та утилізація*. Радіоактивні відходи повинні зберігатись особливим способом, а деякі з них потребують глибокого та постійного захоронення. Низькорівневі відходи, як правило, зберігаються ліцензіатами на місці, або до тих пір, поки вони не можуть бути утилізовані як звичайне сміття. Також можливі випадки коли накопичується достатньо велика кількість відходів для відправки в низькорівневе сховище утилізації відходів в спеціальних контейнерах.

- *регламент*. Це суворі правила, які регулюють комерційне та інституційне використання ядерних матеріалів, що є джерелом п'яти основних типів іонізуючого випромінювання: альфа-частинки, бета-частинки, гамма-промені, рентгенівські промені та нейтрони.

- *моніторинг радіоактивності*. Для вимірювання радіоактивності матеріалів використовуються спеціальні прилади (лічильник Гейгера, сцинтиляційні детектори тощо) вимірювання та контролю радіації.

Міжнародне співробітництво у цій сфері встановило єдине визначення терміну «радіоактивні відходи». Згідно з цим визначенням, «радіоактивні відходи» - це радіоактивний матеріал у газоподібному, рідкому або твердому стані, подальше використання якого не передбачається Договірною державою або фізичною чи юридичною особою, рішення якої визнано Договірною державою. Радіоактивні відходи контролюються відповідно до законодавства та нормативно-правових актів Договірної держави [27]. Національне законодавство держав може встановлювати дещо інші визначення, але вони не повинні суперечити міжнародному визначенню.

Основи інтернаціонального співробітництва і регулювання поводження з радіоактивними відходами містяться в загальних міжнародних актах з питань охорони навколишнього середовища та поводження з відходами. До таких міжнародно-правових актів належать:

- Стокгольмська Декларація або Конференції Організації Об'єднаних Націй з проблем оточуючого людину середовища, яка видана 1972 роком;
- Декларація Конференції Організації Об'єднаних Націй з проблем оточуючого людину середовища, яка була оприлюднена 16 червня 1972 року [28];
- Декларація Ріо-де-Жанейро о навколишньому середовищі та розвитку, яка прийнята у 1992 році [29];
- Базельська конвенція про контроль за транскордонним перевезенням небезпечних відходів і їх видаленням, яка ратифікована 1989 роком [30].

Поводження з радіоактивними відходами охоплює кілька методів, зокрема локалізацію, ізоляцію та захоронення. Основна мета - запобігти викиду радіоактивних матеріалів у навколишнє середовище і захистити здоров'я людей.

Одним із методів поводження з низькоактивними радіоактивними відходами є їх захоронення на спеціалізованих полігонах. Відходи спочатку

ущільнюються, а потім поміщаються в спеціальні контейнери (рис. 2.1), призначені для запобігання витокам. Контейнери поміщають на полігон, призначений для захоронення радіоактивних відходів.



Рис. 2.1. Контейнери з радіоактивними відходами

Радіоактивні відходи середнього і високого рівня вимагають більш суворих методів захоронення. Один із підходів полягає у зберіганні відходів у спеціалізованих об'єктах, таких як глибокі геологічні сховища. Ці об'єкти призначені для зберігання відходів протягом тисяч років, поки радіоактивність не знизиться до безпечного рівня [26].

Наприклад, в такій країні як Швеція після вивантаження твердих радіоактивних відходів з реакторів, їх не переробляють. Згідно з державною політикою, відходи витримують у пристанційних сховищах і розміщують для ізоляції в кристалічних породах. Радіоактивні відходи, які довго живуть, захоронюють на глибині близько 300 м, короткоживучі РАВ зберігаються неподалік від атомної електростанції Форсмарк на глибині близько 60 м, під дном Балтійського моря.

У Фінляндії також затверджена стратегія прямого захоронення відпрацьованого ядерного палива. Радіоактивні відходи розміщують на майданчиках «Ловііса» та «Олкілуото» на глибині 60 - 110 м. Також, їх планується інкапсулювати та розмістити на майданчику «Онкало» в скельних породах на глибині 500 м поблизу АЕС Олкілуото.

Німеччина для переробки відпрацьованого палива користується послугами Франції та Великобританії. В той же час в Німеччині є три майданчики для захоронення РАВ («Конрад», «Асі-2» та «Морслебен») та два майданчики для поверхневого зберігання радіоактивних відходів («Горлебен» та «Ахаус»). Майданчик «Горлебен» призначений для радіоактивних відходів з високим рівнем тепловиділення.

У Франції реалізується закритий ядерний паливний цикл, згідно якого відпрацьоване ядерне паливо не відноситься до відходів. При цьому у Франції напрацьовано понад 1 млн. м³ радіоактивних відходів різних категорій.

2.2. Практика поводження з радіоактивними відходами в Україні

За загальним обсягом радіоактивних відходів Україна сьогодні посідає друге місце в Європі і четверте у світі із обсягом 3,5 млн. метрів кубічних. Нормативно-правові засади поводження з радіоактивними відходами на національному рівні визначаються спеціальним Законом України «Про поводження з радіоактивними відходами» від 30 червня 1995 року, а також Стратегією поводження з радіоактивними відходами в Україні від 19 серпня 2009 року [31] та іншими нормативно-правовими актами.

У зв'язку з аварією на Чорнобильській АЕС (рис. 2.2) питання поводження з радіоактивними відходами в Україні набуває особливої актуальності [32].

Стратегія України щодо поводження з радіоактивними відходами значною мірою визначається існуванням Чорнобильської зони відчуження, яка містить більшу частину ядерних відходів країни і не має місцевого населення. Зона відчуження вважається найбільш придатним місцем для розміщення сховища для остаточного захоронення відходів у ґрунті з подальшим похованням у глибоких геологічних формаціях.

Процес пошуку місця для захоронення РАВ у глибоких геологічних формаціях розпочався у 1993 році, а з 1996 по 2003 рік територія України досліджувалася з метою оцінки потенційно прийнятних місць. У період з 2000

по 2006 роки відбувались роботи з детального дослідження двох перспективних ділянок для можливого зберігання радіоактивних відходів у геологічних формаціях та також технологій ізоляції радіоактивних відходів [34]. Припускалося, що сховище буде використовуватися для зберігання відпрацьованого ядерного палива, а також класифікованих радіоактивних відходів [35].

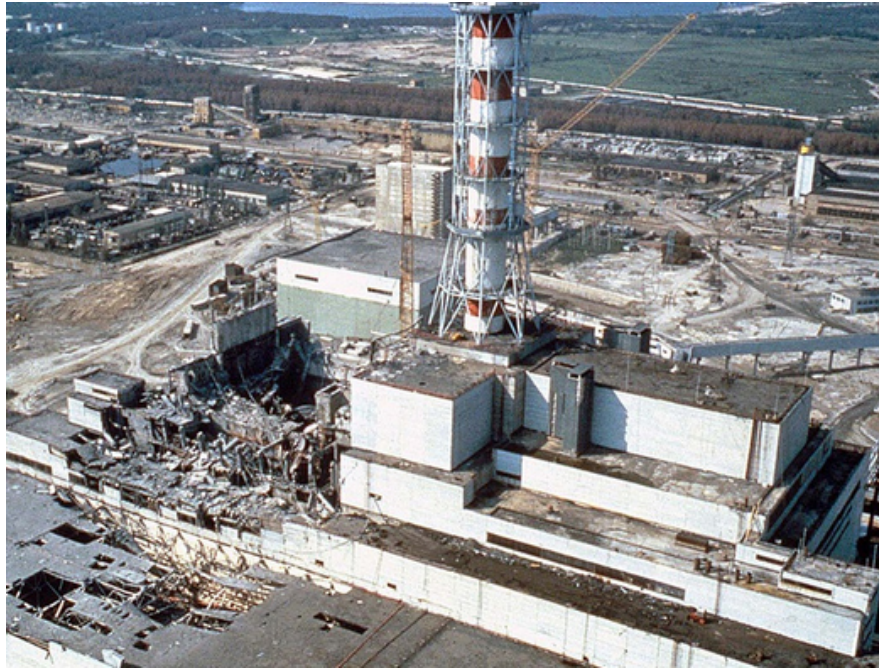


Рис. 2.2. Зруйнований реактор ЧАЕС

Аналізуючи практику поводження з радіоактивними відходами в Україні, слід відмітити, що на найбільшій в Європі - Запорізькій атомній електростанції понад 3000 відпрацьованих ядерних паливних стрижнів зберігаються в металевих бочках у високих бетонних контейнерах на відкритому майданчику станції. Вони знаходяться під відкритим небом, що викликає занепокоєння серед екологів та експертів з атомної енергетики. На сьогоднішній день станція розташована доволі близько до нинішньої лінії фронту, і конфлікт в Україні призвів до того, що країна більше покладається на свої застарілі атомні електростанції. Більша частина ядерного парку України залежить від

окупаційного російського «Росатома», який постачає паливо зі збагаченого урану та вивозить радіоактивні відходи на зберігання [36].

У серпні 2022 року на майданчику Чорнобильської атомної електростанції в Україні вперше відновилася діяльність з переробки та захоронення радіоактивних відходів після російської військової окупації цієї території на початку того ж року. Першу партію відходів із станції на захоронення було передано 21 серпня 2022 року [37]. У травні 2022 року Державна інспекція ядерного регулювання України призупинила дію ліцензій ЧАЕС на поводження з радіоактивними відходами після розгляду впливу пошкоджень у зоні відчуження внаслідок військової окупації, що фактично паралізувало роботу станції.

Відповідно до державних норм радіаційної безпеки, пріоритетним завданням є захист життя, здоров'я персоналу, населення та навколишнього природного середовища від впливу радіоактивних відходів. Для досягнення цієї мети необхідно розмежувати функції державного контролю та управління у сфері поводження з радіоактивними відходами.

Державна політика у цій сфері передбачає виконання довгострокової Загальнодержавної цільової екологічної програми поводження з радіоактивними відходами. Однією з ключових цілей цієї програми є забезпечення мінімального рівня утворення радіоактивних відходів, якого можна досягти на практиці. Це допоможе уникнути неконтрольованого накопичення радіоактивних відходів.

Також доволі важливо буде забезпечити нагляд з боку держави за поводженням з РАВ і вирішити проблему стосовно розміщення новостворюваних сховищ з радіоактивними відходами. При цьому необхідно враховувати думки та інтереси громадян, їх об'єднань, а також місцевих органів державної виконавчої влади і органів місцевого самоврядування.

Для успішної реалізації державної політики у сфері поводження з радіоактивними відходами необхідно дотримуватись державних норм радіаційної безпеки, розмежовувати функції державного контролю та

управління, забезпечувати мінімальний рівень утворення радіоактивних відходів та не допускати їх потрапляння в навколишнє середовище.

Зважаючи на масштабність проблеми утилізації радіоактивних відходів з урахуванням необхідності ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС, Україна активно співпрацює з іншими державами. Так, 18 листопада 2016 року було підписано Угоду між Державною інспекцією ядерного регулювання України та Шведським органом радіаційної безпеки про співробітництво в галузі ядерної та радіаційної безпеки.

Після аналізу різних аспектів міжнародного співробітництва, можна виділити наступні міжнародні принципи поводження з радіоактивними відходами [33]:

1. Принцип захисту природи. Радіоактивні відходи можуть шкодити природним ресурсам, таким як земля, ліси, поверхневі та підземні води та корисні копалини. Тому поводження з радіоактивними відходами повинно бути спрямоване на мінімізацію цього негативного впливу.

2. Принцип захисту майбутніх поколінь. Майбутнім поколінням повинен бути забезпечений як мінімум такий самий рівень захисту від радіації, як і сьогоденішньому поколінню.

3. Принцип захисту населення. Поводження з радіоактивними відходами повинно гарантувати прийнятний рівень захисту здоров'я населення.

4. Принцип транскордонного захисту. Радіоактивні відходи не повинні шкодити життю людей та довкіллю за межами національного кордону.

5. Принцип створення правової основи на національному рівні. Держави, котрі створюють чи використовують радіонукліди, повинні розробити нормативно-правову базу, яка включатиме закони, постанови та директиви щодо поводження з радіоактивними відходами з урахуванням національних стратегій.

6. Принцип безпеки при роботі з радіоактивними відходами.

7. Принцип контролю над виробленням радіоактивних відходів полягає у зведенні виробництва таких відходів до мінімуму.

8. Принцип взаємозалежності між виробленням і поводженням з радіоактивними відходами.

Таким чином, поводження з радіоактивними матеріалами передбачає належне зберігання та утилізацію радіоактивних відходів, суворе регулювання комерційного та інституційного використання ядерних матеріалів, а також використання приладів моніторингу радіоактивності для вимірювання радіоактивності радіоактивних матеріалів.

РОЗДІЛ 3

Перспективні схеми кондиціонування рідких радіоактивних відходів

3.1. Застосування іммобілізації для забезпечення безпечного зберігання рідких радіоактивних відходів

Іммобілізація - це переведення радіоактивних відходів в іншу форму шляхом ствердження, включення в будь-яку матрицю або розміщення у герметичній оболонці [38]. Іммобілізація використовується для забезпечення безпечного зберігання рідких радіоактивних відходів. Цей процес передбачає інкапсуляцію відходів шляхом фізичного оточення їх матрицею, як правило, цементом, склом або керамікою, щоб вони були захоплені і не могли потрапити у навколишнє середовище [38].

Іммобілізація відпрацьованих радіонуклідів відбувається у міцних матеріалах у формі, що забезпечує найважливіший бар'єр, сприяючи підвищенню загальної ефективності будь-якої системи зберігання та/або захоронення. Іммобілізаційна матриця є ключовим елементом у системі інженерних бар'єрів і повинна забезпечувати ізоляцію радіоізотопів після їх розміщення в геологічних сховищах в умовах впливу підземних вод [39].

Найбільш поширеними іммобілізаційними матрицями є скло, яке має низьку здатність іммобілізувати певні довгоживучі продукти радіоактивного розпаду, такі як Zr-93, Tc-99 та Sn-126. Після введення цих продуктів у стабільні іммобілізаційні матриці, їх захоронюють під землею. Хімічна іммобілізація досягається шляхом включення відходів у структуру відповідної матриці, що зменшує потенціал міграції або розсіювання радіонуклідів на етапах експлуатації та захоронення відходів [40].

Іммобілізація рідких радіоактивних відходів є важливим кроком у загальному процесі поводження з ядерними відходами. Вона полегшує поводження, транспортування, зберігання та захоронення радіоактивних відходів. Іммобілізація відходів досягається шляхом їх інкапсуляції в матрицю,

яка забезпечує найважливіший бар'єр, що сприяє підвищенню загальної ефективності будь-якої системи зберігання та захоронення [40]. Іммобілізаційна матриця повинна забезпечувати ізоляцію радіоізоотопів після їх розміщення в геологічних сховищах в умовах впливу підземних вод [39].

Радіоактивні відходи є небезпечним матеріалом, який вимагає належного поводження, зберігання, транспортування та утилізації для забезпечення довгострокової безпеки [41]. Іммобілізація - це процес, який використовується для перетворення радіоактивних відходів у стабільну тверду форму, яка нерозчинна і запобігає дисперсії до навколишнього середовища. Процес іммобілізації - це спосіб кондиціонування, призначений для уповільнення вивільнення радіонуклідів з утилізованого пакету відходів у навколишнє середовище. Нижче наведено декілька способів іммобілізації, що можуть бути використані для забезпечення безпечного зберігання рідких радіоактивних відходів:

Застигання в цементі. Рідкі низькорівневі відходи та відходи проміжного рівня, як правило, застигають у цементі, такий процес також називають цементація. Цементация передбачає змішування відходів з цементом та іншими добавками для отримання стійкої твердої форми, яка нерозчинна і запобігає дисперсії до навколишнього середовища (рис. 3.1).

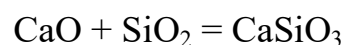


Рис. 3.1. Устаткування для цементування радіоактивних відходів на Рівненській АЕС

Для підвищення ефективності цього процесу вченими Вінницького НТУ було розроблено новий різновид спеціальних бетонів – бетон електропровідний металонасичений (бетел-м) [42]. Це матеріал здатний акумулювати теплову енергію. Він також може бути використаний для виробництва напівпровідників, для створення радіаційноекрануючих покриттів,

Експериментально встановлено [42], що використання сухих металонасичених сумішей дозволяє замонолітити і перевести в твердий агрегатний стан до 50 % рідкої фази. При цьому забезпечуються високі показники механічної стійкості (≥ 5 МПа), екрануючої здатності радіоактивних випромінювань і незначне збільшення об'ємів монолітної маси утвореного продукту.

Вітрифікація в скляній матриці. Високорівневі відходи після кальцинації (сушки) вітрифікуються в скляній матриці. Вітрифікація - це процес, який включає сумісне плавлення відходів та склоутворюючих добавок (найчастіше SiO_2) при високих температурах для отримання стійкої твердої форми, яка нерозчинна та запобігає розповсюдження у навколишньому середовищі. В якості склоутворюючої добавки найчастіше застосовують пісок, при цьому основним хімічним перетворенням є реакція утворення мета силікату кальцію:



Авторами [43] запропонована плазмова технологія вітрифікації ядерних відходів. Вона забезпечує газифікацію органічних компонентів, і перетворення неорганічних компонентів у скломасу (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Продукт вітрифікації [43].

Особливістю цієї технології є порівняно низькій вміст діоксинів і фуранів у газах на виході з системи газоочищення (у 5 разів менше порівняно з традиційним методом проведення вітрифікації).

Інкапсуляція застосовується до відходів і досягається шляхом фізичного оточення їх в контейнері, придатному для за характеристиками таких РАВ. Контейнер повинен бути в змозі витримати випромінювання і тепло, що утворюється відходами, і запобігти викиду радіонуклідів в навколишнє середовище.

Таким чином, іммобілізація є важливим процесом, що використовується для забезпечення безпечного зберігання рідких радіоактивних відходів. Процес передбачає перетворення відходів у стабільну тверду форму, яка нерозчинна і запобігає дисперсії навколишнього середовища. Застигання в цементі, вітрифікація в скляній матриці та інкапсуляція - деякі з способів іммобілізації можуть бути використані для забезпечення безпечного зберігання рідких радіоактивних відходів.

3.2. Розробка нових методів для ефективної очистки рідких радіоактивних відходів

Очистка рідких радіоактивних відходів є багатостадійним процесом. Першим кроком у поводженні з радіоактивними відходами є їх попередня переробка, яка полягає у проведенні: збору, сортування, дезактивації та хімічної обробки [44]. Головна задача цього етапу полягає у визначенні подальшого способу обробки вихідних продуктів. При цьому здійснюються наступні технологічні операції [45]:

1. Розподілення за ступенем активності.
2. Розподілення за періодом напіврозпаду нуклідів.
3. Розподілення за фізичними і хімічними властивостями.
4. Дезактивація.

5. Повернення в технологічний цикл, або, якщо продукти залишаються РРВ, вибір методу їх подальшої обробки.

Переробка рідких радіоактивних відходів може бути здійснена з застосуванням різних способів. Їх розділяють на фізико-хімічні (осадження, коагулювання, сорбція, іонообмін, екстрагування, випарювання, дистиляція), електролітичні (електроліз, електродіаліз, електроіонізація) та біологічні.

Вибір способу переробки залежить від характеристик відходів, таких як радіоактивність, кислотність, солоність і склад.

При очищенні стоків від радіоактивних ізотопів осадженням в воду, що очищується, додається в достатній кількості неактивний ізотоп того ж елемента або інший елемент, який є ізо-аморфним з радіоактивними мікрокомпонентами [46]. Авторами [47] запропоновано використання сорбуючої суспензії мікроорганізмів шляхом фільтрування розчину радіонуклідів крізь шар біомаси мікроорганізмів (біосорбент) з наступним сушінням біосуспензії. В [48] розроблено спосіб очищення води від радіонуклідів за присутності органічних речовин різної природи, який включає термообробку та активацію. Під час термообробки відбувається синтез наносорбента у вигляді наночастинок, які потім осаджуються в умовах впливу імпульсного магнітного поля.

Для переробки рідких радіоактивних відходів розробляються і інші нові ефективні методи окислення і фільтрації для видалення радіоактивних забруднень з рідких відходів [44]. Одним з таких методів є електрохімічне окислення. Він передбачає використання електрохімічного елемента для окислення забруднювальних речовин у потоці відходів. Перевага цього методу полягає в тому, що він не вимагає додавання хімічних речовин і може бути використаний для видалення інших забруднювальних речовин, таких як важкі метали. Інші методи окислення, такі як вдосконалені окислювальні процеси, також досліджуються щодо їхнього потенціалу в обробці рідких радіоактивних відходів.

Для видалення радіоактивних забруднювачів з рідких відходів також удосконалюються методи фільтрації. Наприклад використання мембранних

фільтрів, які призначені для видалення дрібних частинок і забруднювальних речовин із рідини. Інші методи, зокрема адсорбція, також досліджуються на предмет їхньої ефективності для видалення радіоактивних забруднювачів із рідких відходів.

Дослідники розробляють комбіновані методи переробки рідких радіоактивних відходів для підвищення ефективності переробки [44]. Ці комбіновані методи передбачають використання різних матеріалів і процесів, таких як іонний обмін/сорбція, хімічне осадження, неорганічні сорбенти і мікро/ультрафільтрація [49]. Було також встановлено, що використання зворотного осмосу добре очищає рідину, яка мала непрямий чи безпосередній контакт радіоактивними відходами.

Розробляються інноваційні процеси для комплексного очищення рідких радіоактивних відходів. Один з таких процесів базується на методі миттєвого випаровування, який широко використовується в дистиляційних установках. Основна відмінність запропонованого процесу полягає в тому, що дистиляція здійснюється у вакуумі, що дозволяє істотно знизити температуру дистиляції, тим самим зменшити споживання енергії та частково запобігає утворенню вторинних відходів [50].

Переробка рідких радіоактивних відходів вимагає розробки ефективних методів окислення і фільтрації. Вибір методу обробки залежить від характеристик відходів. Дослідники розробляють комбіновані методи переробки рідких радіоактивних відходів для підвищення ефективності їх переробки. Для комплексної переробки рідких радіоактивних відходів розробляються інноваційні процеси, такі як миттєве випаровування, однак він потребує багато енергії або достатньо дорогого обладнання.

Слід додати те, що створення нових методів окиснення та фільтрації для ефективної очистки рідких радіоактивних відходів може включати інноваційні методи окиснення, посилення фільтрації, покращені стратегії утилізації стоків. Все це приводить до мінімізації відходів при дотриманні відповідних міжнародних, галузевих і державних стандартів.

Дослідження інноваційних методів окислення та модернізація вже використовуваних, таких як передові процеси окислення або електрохімічне окислення, для посилення розпаду органічних та неорганічних компонентів у рідких радіоактивних відходах. Ці методи можуть поліпшити загальну ефективність очистки рідких радіоактивних відходів.

На сучасному рівні розвитку науки та технологій пропонуються наступні інноваційні методи:

1) Мокре окислення: процес передбачає використання окиснювача, такого як перекис водню або озон, для руйнування органічних та неорганічних компонентів у відходах. Це низькотемпературний процес, який виробляє чистий розчинник і підходить для біологічних відходів. Однак він вимагає зберігання окиснювача, а залишок вимагає іммобілізації [51].

2) Фентон та Фентон-подібне окислення: процес передбачає використання каталізатора, зокрема заліза, для генерації вільних гідроксильних радикалів та гідроген пероксиду, які розщеплюють органічні компоненти у відходах. Це перспективна технологія обробки органічних радіоактивних відходів, яка може бути застосована у випадку органічних компонентів у складі відходів [52]. При цьому встановлено позитивний вплив ультразвуку на реакцію Фентона за рахунок акустичної кавітації, що дозволить підвищити ефективність цієї технології.

3) Електрохімічне окислення: процес передбачає використання електричного струму для руйнування органічних та неорганічних компонентів у відходах. Це процес, який може бути використаний як технологія обробки рідин з низькорівневими радіоактивними відходами, що містять цезій [53].

4) Гідротермальне окислення: процес передбачає використання високої температури та тиску для руйнування органічних та неорганічних компонентів у відходах. Він має кілька переваг перед традиційними методами окислення, такими як озонування, і підходить для обробки концентратів випарників. Однак він вимагає теплової потужності вище 2 кВт/м^3 і тривалих концентрацій радіонуклідів, що перевищують обмеження для короткоживучих відходів [51].

Інноваційні підходи та технології можуть значно знизити радіотоксичність та кількість відходів. Зменшення обсягу відходів, теплового навантаження та тривалості, яку потрібно ізолювати від оточуючого середовища, значно спростить концепції утилізації відходів.

5) Посилення фільтрації: розробка та впровадження посилених методів фільтрації, включаючи використання наноматеріалів, мембран або передових сорбентів. Ці технології можуть допомогти ефективніше захоплювати та видаляти радіоактивні частинки та забруднюючі речовини.

Також здійснюється розробка ефективних та безпечних стратегій утилізації очищених стоків. До них відносяться: контрольований випуск, рекультивация або додаткова обробка для забезпечення відповідності нормативним стандартам.

Важливим елементом стратегії поводження з відходами є мінімізація відходів. В цьому напрямку досліджуються способи мінімізації утворення рідких радіоактивних відходів, впроваджуються практики скорочення джерел РАВ та оптимізація процесів для зменшення виробництва відходів, зменшуючи таким чином обсяги відходів, що потребують переробки.

Слід зазначити, що вчені та спеціалісти підприємств, що працюють з радіоактивними матеріалами повинні завжди бути в курсі змін регуляторних вимог і переконуватись, що розроблені методи окислення та фільтрації відповідають або перевищують ці стандарти [54]. Добре навчений персонал може підвищити ефективність і безпеку операцій з очищення рідких радіоактивних відходів.

Розробка нових методів ефективної очистки радіоактивних відходів спрямована на сприяння безпечному та ефективному управлінню рідкими радіоактивними відходами.

РОЗДІЛ 4

Об'єкти та методи дослідження

4.1. Об'єкти дослідження

Об'єктом дослідження були рідкі та тверді радіоактивні відходи ЧАЕС.

Рідкі радіоактивні відходи та радіоактивна вода на ЧАЕС можуть бути класифіковані за наступними критеріями:

1. За складом:

- радіоактивні води, що містять радіонукліди та домішки (іони амонію, сульфати, хлориди, фосфати, поверхнево-активні речовини та органічні речовини);
- рідкі радіоактивні відходи, що містять радіонукліди та домішки (відходи нафти, розчинники, кислоти, луги, солі важких металів тощо).

2. За рівнем радіоактивності:

- низькорадіоактивні рідкі відходи (питома активність не перевищує 10^{-5} кюрі/л);
- середньорадіоактивні рідкі відходи (питома активність від 10^{-5} до кюрі/л);
- високорадіоактивні рідкі відходи (питома активність вище 1 кюрі/л).

3. За походженням:

- радіоактивна вода, що надходить з об'єктів ЧАЕС (наприклад, з реакторних приміщень, з-під об'єкту «Укриття», систем охолодження реакторів, систем очищення радіоактивного газу тощо);
- радіоактивні води, що надходять з системи спеціальної каналізації ДСП ЧАЕС;
- рідкі радіоактивні відходи, що утворюються під час робіт на об'єктах ЧАЕС (наприклад, під час демонтажу обладнання, прибирання приміщень тощо).

Тверді радіоактивні відходи ЧАЕС можуть бути розподілені наступним чином:

1. ТРВ I та II груп, рівень радіоактивного забруднення яких перевищує $500 \beta\text{-част}/(\text{см}^2 \cdot \text{хв})$.

2) Відходи, що утворилися в приміщеннях III підзони (майстерні, лабораторії, приміщення постійного перебування персоналу і т.д.).

4.2. Фізико-хімічні методи дослідження радіоактивної води

Визначення рН здійснювали за допомогою автоматичного приладу рН-150М, в основу роботи якого покладено потенціометричний метод вимірювання показника кислотності досліджуємого розчину.



Рис. 4.1. Автоматичний рН-метр рН-150М

При вимірюванні рН розчинів використовується електродна система, що складається з вимірювального електрода та електрода порівняння. Така система, занурена в аналізований розчин, розвиває електрорушійну силу (ЕРС), пропорційну показнику активності іонів водню ($\text{pH} = -\lg a(\text{H}^+)$) або співвідношенню концентрацій окисленої та відновленої форм редокс-системи.

Електрорушійна сила електродної системи залежить також від температури аналізованого розчину. Для обліку впливу температури на електродну систему (термокомпенсації) використовується датчик температури, який побудований на основі терморезистора.

Значення рН при якому ЕРС залежить від температури називається ізопотенційною точкою, а відповідне їй значення «рХі» називається координатами ізопотенційної точки. На основі виміряної величини

електрорушійної сили вторинний перетворювач здійснює розрахунок значення рН за наступною формулою:

$$pH = pX_i - (E - E_i) / K_s \cdot (54,1 + 0,198 t), \text{ де}$$

E – виміряна електрорушійна сила електродної системи, мВ;

pX_i – координата ізопотенційної точки електродної системи;

E_i – координата ізопотенційної точки електродної системи, мВ;

K_s – частка, яку становить реальна крутість електродної характеристики від теоретичного значення, що дорівнює математичному виразу $(54,1 + 0,198 t)$;

t – температура розчину, виміряна за допомогою термодатчика або введена вручну.

Значення рН виводиться на екран перетворювача (рис. 4.1).

Електропровідність визначали за допомогою кондуктометра COND 3210 (рис. 4.2), який являє собою портативний прилад з виносними датчиками (вимірювальними електродами), що забезпечують вимірювання параметрів водного середовища. Принцип дії заснований на вимірі струму електродних систем первинних перетворювачів (двох- та чотирьополюсних кондуктометричних осередків).

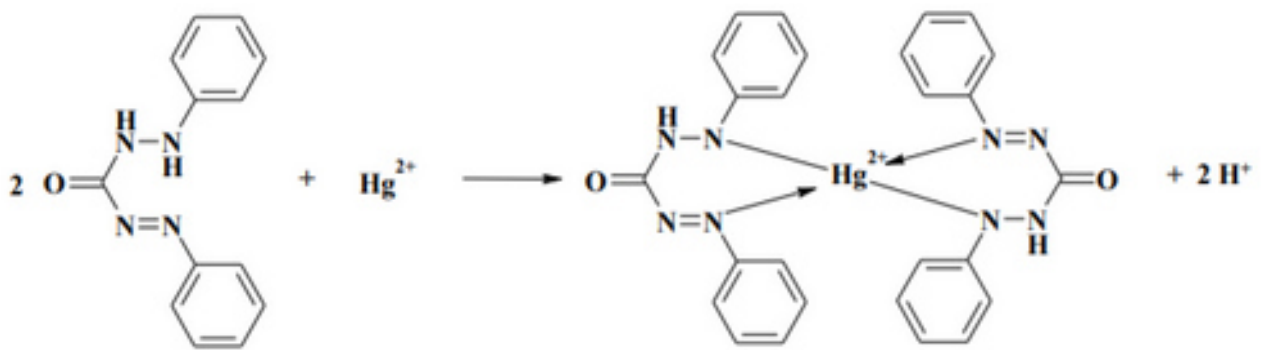


Рис. 4.2. Кондуктометра COND 3210.

Концентрацію хлорид йонів визначали меркуриметричним методом [56]. Цей метод ґрунтується на взаємодії хлорид-іонів з іонами Hg_2^{+2} та утворенням

мало дисоційованої сполуки Hg_2Cl_2 ($K_s^0 = 1,3 \cdot 10^{-18}$). В якості титранту використовували 0,1М розчин, який готували з відповідної наважки $\text{Hg}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. До розчину додавали 2М розчин нітратної кислоти та нагрівали до повного розчинення кристалогідрату. Потім додавали 4-5 крапель металічної ртуті та витримували добу для утворення у розчині йонів Hg_2^{2+} згідно реакції $\text{Hg}^{2+} + \text{Hg} = \text{Hg}_2^{2+}$. Одержаний розчин стандартизували за розчином NaCl .

В якості індикатора титрування використовували адсорбційний індикатор – дифенілкарбазон (етанольний розчин). Його дія забезпечується тим, що надлишкова крапля титранту - розчину гідраргіуму(I) утворює з індикатором дифенілкарбазоном у кислому середовищі ($\text{pH} = 2,5 \pm 0,2$) комплексну сполуку фіолетового кольору. Утворення такого забарвлення є показником припинення титрування.



Концентрацію йонів алюмінію визначали фотометричним методом з використанням спектрофотометра СФ-103 (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Спектрофотометр СФ-103.

Визначення засноване на взаємодії йонів алюмінію при рН=6 з органічним реагентом трифенілметанового ряду сульфохромом у присутності катіонної поверхнево-активної речовини (цетилпіридиній хлорид) з утворенням комплексної сполуки фіолетового кольору. Оптичну густину розчину вимірювали при $\lambda = 630$ нм. Вплив зважених та колоїдних речовин усували попереднім фільтруванням проби. Можливий вплив органічних домішок в аналізованій воді усували попереднім УФ-опроміненням проби.

Концентрацію йонів феруму(III) визначали фотометричним методом з використанням фотометра КФК-3 (рис 4.4).



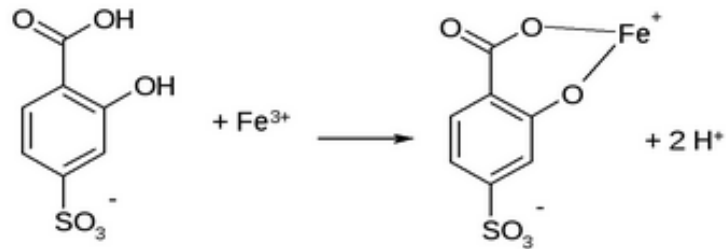
Рис. 4.4. Фотометр КФК-3.

Принцип дії фотометра ґрунтується на порівнянні інтенсивності потоку випромінювання Φ_0 , що пройшов через "холосту пробу" (контрольний розчин, по відношенню до якого проводиться вимір), і потоку випромінювання Φ , що пройшов через досліджуваний розчин.

Потоки випромінювання Φ_0 і Φ перетворюються фотоприймачем на електричні сигнали, які обробляються та подаються на індикаторі у вигляді оптичної густини (D), за якою по калібрувальному графіку (рис. 4.5) визначається концентрація. Для одержання калібрувального графіка використовували стандартний розчин містить, що 0,1 мг/мл йонів феруму(III).

Його готували розчиненням відповідної наважки залізо амонійного галуну. Розчини підкислювали 0,5М сульфатною кислотою до рН=2 та додавали сульфосаліцилову кислоту. При цьому утворювалися розчини червоно-фіолетового кольору (рис. 4.6) , які фотометрували при довжині хвилі 540 нм.

При рН < 3



[FeSal] - фіолетовий; $K_{\text{стійк.}} = 10^{17}$; $\lambda_{\text{max}} = 540 \text{ нм.}$

D

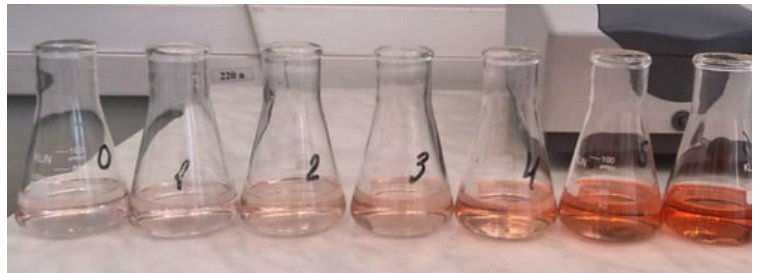
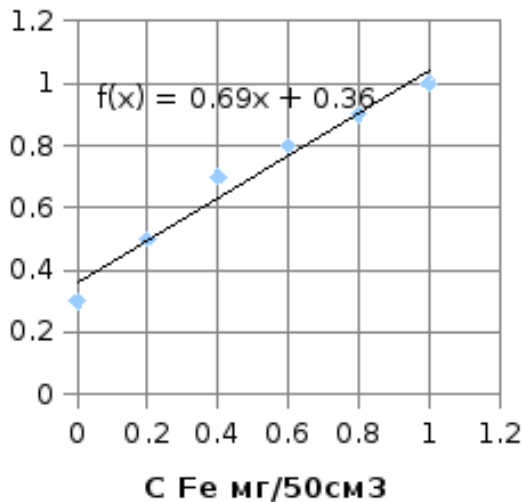


Рис. 4.5. Калібрувальний графік для фотометричного визначення іонів Феруму(III) для одержання концентрації іонів Феруму(III) калібрувального графіка

4.3. Оцінка ефективності очищення води на спеціальній установці водоочищення СВО-4

Для оцінки ефективності очищення води розраховували ступінь очищення:

$$\eta = \frac{\text{показник}_{\text{до очищення}} - \text{показник}_{\text{після очищення}}}{\text{показник}_{\text{до очищення}}} \times 100\%$$

Розрахунок проводили для кожного показника, в тому числі концентрація хлорид йонів, концентрація йонів алюмінію, концентрація йонів феруму(III), електропровідність. Вважали, що зміна електропровідності є показником загального вмісту електролітів у розчині.

Обчислювали ефективність очищення на першій стадії технологічного процесу та в цілому (після 2-х стадій порівняно з початковим значенням).

РОЗДІЛ 5

Поводження з радіоактивними відходами ЧАЕС

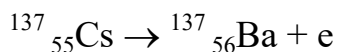
Станом на кінець 2023 року, на Чорнобильській АЕС радіоактивні відходи, які потребують спеціального поводження, залишаються у значній кількості (22645 м³ радіоактивних відходів [57]). З них рідких РАВ – 20133 м³.

Тверді РАВ знаходяться у:

- сховищі твердих відходів (2502 м³);
- відкритому сховищі твердих високоактивних відходів (8 м³);
- сховищі рідких та твердих відходів (2 м³).

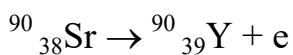
Основними реакціями радіоактивного розпаду, які відбуваються є:

1) β-розпад ізотопу Цезію-137 з утворенням стабільного Барію-137:

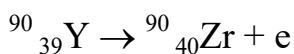


Період напіврозпаду Цезію-137 становить 30,17 років.

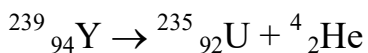
2) β-розпад ізотопу Sr-90 (період напіврозпаду 29,1 років), який перетворюється на радіоактивний ітрій-90:



3) Утворений ітрій-90 також є β-випромінювачем (період напіврозпаду 64,1 година):



4) α-розпад Плутонію-239, який призводить до утворення радіоактивного Урану-235:



Тверді та рідкі відходи було накопичено у процесі експлуатації станції. Вони переробляються та зберігаються на спеціальних підприємствах, яким держава та уповноважені міжнародні організації з ядерного нагляду, зокрема МАГАТЕ, надали відповідні дозволи.

На майданчику ЧАЕС функціонують наступні об'єкти поводження з радіоактивними відходами [57]:

1. Завод із переробки рідких радіоактивних відходів.
2. Промисловий комплекс із поводження з твердими РАВ.
3. Комплекс із виробництва металевих бочок і залізобетонних контейнерів для зберігання радіоактивних відходів.

Стандарти поводження з радіоактивними відходами на ЧАЕС відповідають вимогам законодавства та міжнародних стандартів. Загалом, стандарти поводження з радіоактивними відходами на ЧАЕС передбачають виконання нормативних вимог та застосування спеціальних методів переробки та контролю за рівнями викидів радіоактивних речовин в атмосферне повітря [55].

При роботі з відходами періодично переглядаються чинні документи, діяльність, пов'язана з радіоактивними відходами, погоджується з регуляторними органами для отримання нової актуальної інформації. Нові дослідження активно впроваджуються в практику.

Визначено, що поводження з рідкими радіоактивними відходами на ЧАЕС включає в себе наступні стадії:

1. Характеристика (визначення класу відходів на підставі потужності дози шкідливого γ - випромінювання) та сегрегація (розподіл).
2. Імобілізація.
3. Випуск стічних радіоактивних вод.
4. Планування виведення з експлуатації.
5. Моніторинг і спостереження.

Поводження з твердими радіоактивними відходами включає:

1. Проектування складських приміщень з дотримання усіх стандартів.
2. Стратегії безпечного виведення відпрацьованих радіоактивних матеріалів з експлуатації.
3. Встановлення категорій та сегрегація відходів.
4. Екранування та зберігання.
5. Упаковка, маркування та транспортування відходів.

6. Стратегії виведення з утилізації й подальшого зберігання РАВ.

Таким чином, можна зробити висновок, що поводження з рідкими та твердими радіоактивними відходами:

1. Відповідають нормативним вимогам при пакуванні, транспортуванні, переробці і зберіганні.
2. Забезпечена прозорість і доступність процедур для всього спеціалізованого персоналу, що задіяний у будь-якій роботі з радіоактивними відходами.
3. Спостерігається безперервне вдосконалення та дослідження нових шляхів перевезення, утилізації і зберігання рідких та твердих РАВ.

Важливо відзначити, що конкретні деталі щодо стандартів та процедур доступні через наявні нормативні документи, розроблені керівні принципи щодо об'єкта та періодичні оцінки безпеки, що здійснюються відповідними органами. Нормативні документи на ДСП ЧАЕС, ЦСВЯП переглядаються кожні 3 роки.

5.1. Поводження з радіоактивними водами на ЧАЕС

Порядок поводження з радіоактивними водами на Чорнобильській АЕС наступний:

1. Збір і зберігання радіоактивної води в спеціальних резервуарах і резервуарах на об'єктах АЕС.
2. Обробка радіоактивної води в спеціальних установках, де здійснюються фізико-хімічні методи очищення, в тому числі фільтрація, іонообмінне очищення, очищення з використанням зворотного осмосу.
3. Контроль якості очищеної радіоактивної води.
4. Передача очищеної радіоактивної води в систему спеціальної каналізації ДСП ЧАЕС.

5. Моніторинг радіоактивних вод в системі спеціальної каналізації Чорнобильської АЕС, який здійснюється за допомогою спеціальних приладів і радіологічних аналізів.

6. Відновлення радіоактивної води, що включає випаровування та зворотний осмос.

7. Моніторинг утилізації радіоактивних вод за також допомогою спеціальних приладів і аналізів.

Важливо відзначити, що кожен етап порядку поводження з радіоактивними водами на ЧАЕС вимагає дотримання певних правил і норм, а також контролю якості та радіаційної безпеки. Наприклад, при зборі і зберіганні радіоактивної води дотримуються вимог герметичності ємностей, а також регулярно стежать за радіаційною обстановкою. Певних параметрів, таких як рН, температура, концентрація радіонуклідів тощо, дотримуються при очищенні радіоактивних вод. Крім того, проводиться регулярний моніторинг якості очищеної радіоактивної води та контроль її передачі в систему спеціальної каналізації Чорнобильської АЕС. Всі ці заходи спрямовані на забезпечення безпеки персоналу та навколишнього середовища, а також на запобігання забрудненню води.

Управління радіоактивними водами на Чорнобильській АЕС регулюється такими нормативними документами, як «Правила поводження з радіоактивними відходами на об'єктах атомної енергетики» та «Стандарти радіаційної безпеки (УХО-99/2009)».

Усі рідкі радіоактивні відходи переробляються на заводі з переробки рідких РАВ. Згідно технології вони проходять процедуру іммобілізації і перетворюються на цементну суміш. Одержана суміш пакується у 200-літрові бочки, які у свою чергу пакуються у залізобетонний контейнер по 4 штуки. Контейнер з переробленими рідкими радіоактивними відходами відправляється на захоронення у спеціально обладнане приповерхнє сховище твердих радіоактивних відходів (комплекс виробництв «Вектор»).

Поводження з рідкими радіоактивними відходами залежить від їх різновиду і полягає в проведенні наступних технологічних операцій:

1. Обробка кубічного залишку. Кубічний залишок є сольовим розчином з вмістом солі біля 600 г/л. Його основним компонентом є натрій нітрат. Кубічний залишок утворюється внаслідок переробки на випарній установці спеціального водоочищення СВО-4 першої черги радіоактивних вод, що надходять до системи спецканалізації або сховища рідких радіоактивних відходів СВО-4.

Нижче наведено (табл. 5.1) технічні характеристики для фільтруючої системи типу СВО-4.

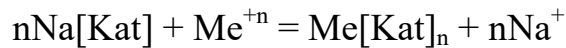
Таблиця 5.1

Технічні характеристики фільтруючої системи типу СВО-4

Найменування	Технічні характеристики
Фільтр НЕРА	1) Розрахунковий тиск на корпус 07 МПа. 2) Робоча температура 37,6 °С. 3) Ефективність фільтрації 99,97%, при розмірі комірки 0,3 мкм. 4) Габаритні розміри 720 × 540 × 510мм. 5) Маса 45 кг.

2. Управління відпрацьованими іонообмінними смолами установок СВО. Для очищення технологічних середовищ на ЧАЕС (деаерована вода установки СВО-4, скидання після промивок іонітів від установок СВО) від радіонуклідів та розчинених солей застосовуються полістирольні гранульовані катіоніти та аніоніти гелевої структури типу КУ-2-8 та АВ-17-8 або їх закордонні аналоги, сертифіковані в Україні.

Катіоніт КУ-2-8 являє собою високомолекулярну полімерну сполуку з просторовою драгледоподібною структурою та макропорами. Тип матриці – дивініл бензолна, йонна форма – натрієва (Na^+), функціональні групи – сульфогрупи. Катіоніт не розчиняється в кислотах, лугах та органічних розчинниках. При пропусканні води відбувається іонообмін за реакцією:



Аніоніт АВ-17-8 являє собою аніонообмінну смолу на основі сополімеру стиролу та дивініл бензолу з бензилтриметиламонієвими функціональними групами.

Відпрацьовані іоніти від установок СВО використовуються для попереднього очищення трапних вод від механічних домішок. Для цього їх перевантажують гідротранспортом у вузол попереднього очищення трапних вод.

3. Обробка відпрацьованої фільтрувальної пульпи установок спеціального водоочищення. Для очищення технологічних середовищ на ЧАЕС (скидання після промивань іонітів від установок СВО) від нафтопродуктів та механічних домішок застосовується фільтрувальний перлітовий порошок.

4. Обробка шламу: в результаті попереднього очищення вод, що надходять у приймальні ємності системи спецканалізації, у пісковловлювачі установки СВО-4 можуть утворюватися шлами (механічні домішки - пісок, продукти корозії, механічний бруд тощо). Частинки розміром більше 2 мм уловлюються в пастці пісколовки, а частинки менше 2 мм осаджуються за рахунок малої швидкості води та сили тяжіння в корпусі пісколовки. Заповнена шламом пісковловлювач вивантажується в ємності зберігання відпрацьованого фільтроперліту 4А-203/1,2.

5. Обробка горючих рідких радіоактивних відходів. До горючих РРВ відносяться відпрацьовані органічні рідини (олії), щодо яких цехом-власником прийнято рішення про неможливість подальшого їх використання та які мають радіаційні характеристики. Горючі РРВ, які утворюються на етапах зняття з експлуатації ДСП ЧАЕС та перетворення об'єкта «Укриття» в екологічно безпечну систему, а також накопичені раніше, підлягають переробці на ЗПТРО методом спалювання з подальшим очищенням димових газів і цементуванням золи, що утворюється. Прийом горючих РРВ на спалювання має здійснюватися відповідно до інструкції 68Е-ЦПРАВ після введення ЗПТРВ в експлуатацію.

Система поводження з РРВ спроектована таким чином, щоб оціночні розрахункові значення ресурсу системи в цілому та основних елементів були вищими за 30 років.

До системи поводження з рідкими радіоактивними відходами входять:

- трапи спецканалізації;
- знімні сітчасті фільтри трапів;
- приямки спецканалізації;
- трубопроводи та арматура спецканалізації;
- дренажні насоси у приямках спецканалізації (3 шт.);
- баки трапних вод (2 шт.);
- бак переливів із баків трапних вод;
- насоси баків трапних вод (2 шт.);
- насос бака переливів;
- трубопроводи та арматура обв'язування баків трапних вод, бака переливу та насосів;
- КВП (перетворювачі тиску, рівнеміри, датчики та сигналізатори) рівня, об'ємний витратомір);
- місцевий щит керування.

У процесі поводження з РРВ передбачено контроль наступних параметрів:

- потужність дози гамма-випромінювання від баків трапних вод датчиками системи радіаційного контролю;
- рівень РРВ у баках трапних вод та в баку переливів рівнемірами;
- рівень РРВ у приямках датчиками та сигналізаторами;
- обсяг РРВ, що перекачуються в ТУК, для відправки на ЧАЕС за допомогою об'ємного витратоміра;
- стан насосів (увімкнений/вимкнений);
- тиск на натиску насосів баків трапних вод, бака переливів, у приямках;
- стани електрифікованої арматури.

Контроль об'ємної активності та радіонуклідного складу рідких радіоактивних відходів виконують методом пробовідбору та подальшим аналізом.

Фізико-хімічні показники радіоактивної води, що поступає на очищення в СВО-4 наведена у табл. 5.2. Контроль проводився з використанням лабораторного обладнання ЧАЕС раз у тиждень. Характеристика (фізико-хімічні показники) води після першого та другого ступенів очищення наведена відповідно у табл. 5.3 та табл. 5.4.

Слід зазначити, що фізико-хімічні показники води після другого ступеня очищення відповідають нормативній документації, згідно якої: значення рН повинно знаходитися в межах 5,5...8,5; питома електропровідність (κ) <40 мкСм/см; концентрація хлорид йонів < 2,5 мг/дм³, йонів гідрогену <1,5 мг/дм³, йонів феруму(III) < 1,2 мг/дм³ та йонів алюмінію <1,2 мг/дм³.

Таблиця 5.2

Фізико-хімічні показники трапних вод, що надходять на очищення

№ з/п	рН	Питома електро- провідність (κ) мкСм/ см	Концентрація, мг/дм ³			
			Cl ⁻	H ⁺	Fe ⁺³	Al ⁺³
1	6,90	1750	10,00	0,30	0,35	0,38
2	6,80	1600	9,50	0,27	0,32	0,30
3	6,87	1625	10,30	0,26	0,31	0,27
4	6,18	1640	8,50	0,24	0,30	0,26
5	6,92	1570	7,37	0,28	0,33	0,28

Таблиця 5.2

Фізико-хімічні показники води після першого ступеня очищення

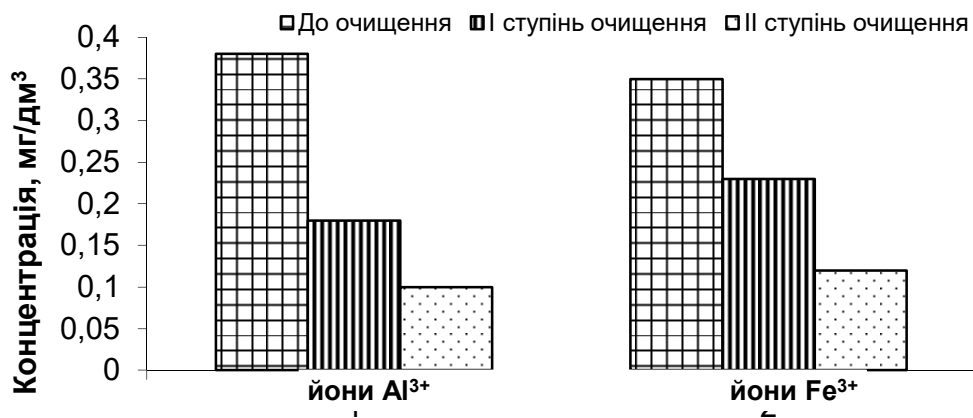
№ з/п	рН	Питома електро- провідність (κ) мкСм/ см	Концентрація, мг/дм ³			
			Cl ⁻	H ⁺	Fe ⁺³	Al ⁺³
1	5,80	410	2,00	0,25	0,23	0,18

2	5,60	412	3,25	0,24	0,27	0,17
3	5,50	205	2,45	0,23	0,23	0,16
4	5,70	208	0,90	0,20	0,24	0,15
5	5,54	240	0,95	0,22	0,26	0,14

Таблиця 5.4

Фізико-хімічні показники води після другого ступеня очищення

№ з/п	рН	Питома електро- провідність (æ) мкСм/ см	Концентрація, мг/дм ³			
			Cl ⁻	H ⁺	Fe ⁺³	Al ⁺³
1	5,20	28,0	1,03	0,20	0,12	0,10
2	5,24	26,3	1,00	0,20	0,14	0,09
3	5,27	22,3	0,71	0,19	0,12	0,08
4	5,28	24,9	0,72	0,17	0,10	0,09
5	5,23	25,5	0,96	0,18	0,12	0,10



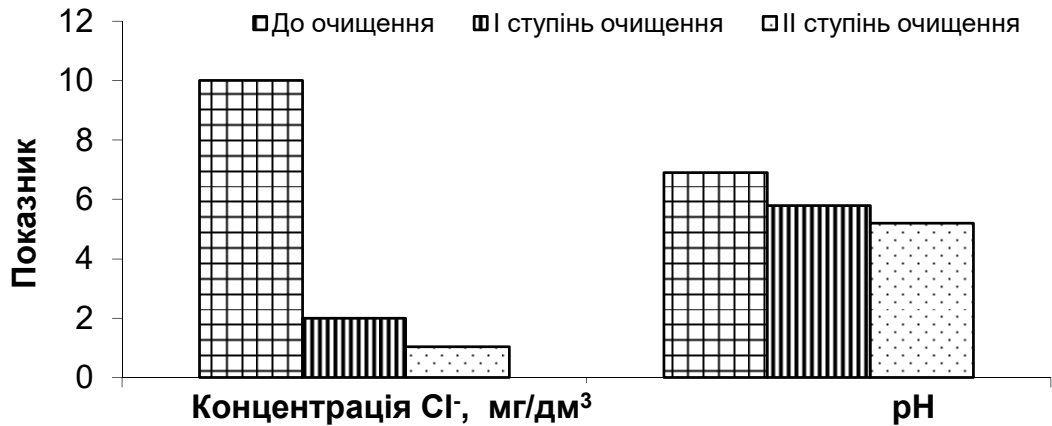


Рис. 5.1. Показники радіоактивної води до очищення та після проходження відповідних стадій очищення (для точки 1 з табл. 5.2 – 5.4)

Аналіз результатів (точка 1), показав (рис. 5.1, табл. 5.5), що ступінь очищення забрудненої води від йонів алюмінію(III) після першої стадії становить 52,6 %, після другої – 73,4 %; від йонів феруму(III) – 34,3 % та 65,7 % відповідно; від хлорид йонів – 80 % та 89,7 % відповідно [58]. Звертає на увагу, що ступінь очищення від катіонів алюмінію та аніонів хлору на першій стадії значно більше, ніж на 2-гій. В той же час зменшення концентрації йонів феруму(III) на першій і другій стадії майже однакове. В цілому, найбільш ефективно очищення відбувається від аніонів хлору. Показник кислотності середовища (рН) зменшується після першої стадії на 1,1, після другої – ще на 0,6 одиниць рН. Це вказує про підкислення розчину і пов'язано з особливостями технології очищення, зокрема використання іонітного фільтра.

Електропровідність, як загальний показник вмісту йонів, знижується після першої стадії в 4,3 рази (з 1750 до 410 мкСм/см), після другої (порівняно з початковим значенням) – у 14,6 разів (з 410 до 28 мкСм/см). Це дозволяє оцінити ефективність очищення від електролітів на першій стадії у 76,6 %, після другій – у 98,4 % [58].

Аналогічні розрахунки проведені для кожної контрольної точки (табл. 5.5).

Таблиця 5.5

Оцінка ефективності очищення (щотижневий відбір проб, листопад 2023 р.)

№ з/п	Ефективність очищення після відповідної стадії (η), %							
	Cl ⁻		Fe ⁺³		Al ⁺³		електроліти	
	I	II	I	II	I	II	I	II
1	80,0	89,7	34,3	65,7	52,6	73,4	76,6	98,4
2	65,8	89,5	15,6	56,3	43,3	70,0	74,25	98,4
3	76,2	93,1	25,8	61,3	40,7	70,4	87,4	98,6
4	89,4	91,5	20,0	66,7	42,3	65,4	87,3	98,5
5	87,1	86,9	21,2	63,6	50,0	64,3	84,7	98,4
Середнє значення	79,7	90,1	23,4	62,7	45,8	68,7	82,1	98,5

З табл. 5.5 видно, що завдяки наявній системі очищення в середньому досягається 90,1 % очищення по хлорид-йонам, 62,7 % - по катіонам феруму(III), 68,7 % по йонам алюмінію та загальний ступінь вилучення електролітів становить 98,5 %.

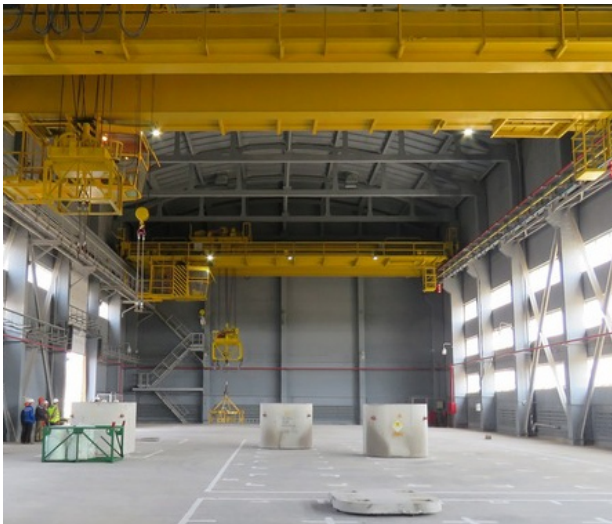
Підвищити ефективність очищення радіоактивної води можна збільшенням ступеня очищення по катіонам, зокрема йонам феруму(III) та алюмінію. Ефективними методами очищення від зазначених йонів можуть бути коагуляція та електрокоагуляція [59]. При цьому, авторами [59] пропонується використання коагулянтів на основі бішофіту, родовище якого знаходиться в Чернігівській області. Також ефективний коагулянт (у складі якого є фосфат йони) для очищення води від йонів металів розроблено авторами [60].

5.2. Тверді радіоактивні відходи та поводження з ними

Переробка твердих РАВ на ЧАЕС відбувається на промисловому комплексі із поводження з твердими радіоактивними відходами. Після переробки відходи зберігаються на тимчасових майданчиках складування або ж транспортуються на пункт захоронення РАВ «Буряківка».

Регулювання поводження з твердими радіоактивними відходами на ЧАЕС, як і регулювання поводження з РРВ, теж має свої особливості.

Нами з'ясовано, що відходи, для яких за результатами первинного радіаційного контролю встановлено рівень радіоактивного забруднення більше $500 \beta\text{-част}/(\text{см}^2 \cdot \text{хв})$, ПЕД на відстані $0,1\text{м} > 1 \times 10^{-3} \text{ мЗв/год}$, і які класифіковані як ТРВ I і II групи, збирають в контейнери-збірники (рис. 5.2.). Постійні місця встановлення контейнерів-збірників на проммайданчику ЧАЕС (включаючи ОУ) визначені відповідною схемою, ЗС-ЦОРО (інв. № ТВ-09 від 25.10.2016 р). Видалення ТРВ з контейнерів-збірників проводиться по мірі їх заповнення. Тверді радіоактивні відходи з контейнерів-збірників перевантажують навалом в кузов спеціального автотранспорту.



а



б

Рис. 5.2. Поводження з твердими РАВ: а) контейнери з твердими РАВ; б) спецавтотранспорт

В місцях утворення збір ТРВ проводиться в поліетиленові або багатошарові паперові мішки розміром не більше $850 \times 500 \times 500$ мм. Мішки, що використовуються, повинні бути міцними, стійкими до впливу низьких температур. Підрозділи повинні мати необхідний запас мішків для видалення утворених відходів. Видалення мішків з відходами з місць збору здійснюється тільки в зав'язаному вигляді.

На захоронення в приповерхневі сховища (траншеї) ПЗРВ «Буряківка» приймають лише ті ТРВ, які відповідають вимогам, встановленим «Критеріями приймання радіоактивних відходів на захоронення у ПЗРВ», № КР-П 113.004-2011.

Також нами з'ясовано порядок збору, тимчасового зберігання та видалення ТРВ I і II групи в приміщеннях головного корпусу ЧАЕС. Прийом ТРВ I і II групи в головному корпусі ЧАЕС здійснюється в пунктах прийому ТРВ (ППТРВ):

- приміщення 167 блоку «Е» - для прийому ТРВ з приміщень 1-ої черги;
- приміщення 230 ДСРВ - для прийому ТРВ з приміщень 2-ої черги.

Відходи, що утворилися в приміщеннях III підзони (майстерні, лабораторії, приміщення постійного перебування персоналу і т.д.) в ході проведення робіт не по ЄНД видаляються в ППТРВ в первинній упаковці. Видалення таких відходів допускається проводити без дозиметричного контролю. Ці відходи обстежуються переробником РАВ ЦПРВ безпосередньо в ППТРВ. Відповідальність за зміст і наявність в приміщеннях ємностей для збору відходів і своєчасне їх видалення несе визначена відповідальна особа.

Прийом ТРВ I і II групи в ППТРВ виконує переробник РАВ ЦПРВ. Робота ППТРВ здійснюється згідно з затвердженим графіком.

У ППТРВ розміщене наступне обладнання:

- датчики контролю потужності дози зі світловою сигналізацією;
- прилад контролю поверхневої забрудненості СЗБ-04;
- датчик контролю аерозольної активності;
- сортувальний стіл;
- контейнери-збірники для збору та тимчасового зберігання ТРВ I і II групи.

Для видалення ТРВ спеціальний автотранспорт прибуває до ППТРВ.

Персонал ЦПРВ здійснює перевантаження твердих радіоактивних відходів з контейнерів-збірників в кузов САТ. Роботи виконуються по єдиному нарядно-допуску під контролем дозиметриста цеху радіаційної безпеки.

Майстер ділянки ЦПРВ оформляє два примірники (оригінал і ксерокопію оригіналу) «Довідки на право вивезення ТРВ з об'єктів ДСП ЧАЕС» та реєструє її в «Журналі обліку видачі довідок на право вивезення ТРВ з об'єктів ДСП ЧАЕС».

Вся документація, розроблена для виконання робіт підрядними організаціями на території ДСП ЧАЕС в результаті яких можливе утворення ТРВ, повинна бути підготовлена з урахуванням наступних вимог:

- прописані підготовчі заходи для виконання робіт, що передбачають утворення ТРВ (підготовка і навчання персоналу і т.д.) відповідно до чинних НД і ЕТД;
- наведено перелік виконуваних робіт при поводженні з ТРВ згідно з контрактними зобов'язаннями, закріпленими за Підрядником/Замовником;
- вказані планові (прогнозовані) місця утворення ТРВ;
- описані характеристики очікуваних первинних ТРВ (залізобетонні конструкції, ґрунт, метал і т.д.) і вторинних ТРВ (додаткові ЗІЗ, радіоактивно забруднене обладнання, інструмент тощо);
- вказана орієнтовна кількість первинних і вторинних ТРВ (обсяг і маса) з поділом згідно з класифікацією ТРВ;
- описана послідовність виконання робіт з утворенням ТРВ;
- описана процедура сортування ТРВ згідно застосовуваної на ДСП ЧАЕС класифікації;
- описаний процес поводження з класифікованими ТРВ, вказані маршрути транспортування ТРВ, місця збору і тимчасового зберігання, порядок видалення ТРВ;
- описані заходи безпеки при поводженні з ТРВ (при зборі, фрагментації, сортуванні, видаленні з місць утворення, завантаженні в САТ, транспортуванні та ін.);

- вказані основний і резервний маршрути руху спецавтотранспорту, задіяного в транспортуванні ТРВ, з обов'язковим описом, в яких випадках здійснюється транспортування по резервному маршруту;
- описаний порядок дій персоналу при виявленні ВАВ;
- описані заходи по дезактивації радіоактивно-забрудненого обладнання, матеріалів, інструменту, передбачуваних до подальшого використання.

Ця документація в обов'язковому порядку повинна бути погоджена з цехом-власником території, а також з ЦРБ та ЦПРВ.

На випадок непередбачуваних обставин (нешасний випадок) є основний перелік пунктів, які повинні виконуватись усіма працівниками підприємства, а саме:

- негайно припинити роботу;
- надати першу допомогу потерпілому;
- негайно повідомити про нещасний випадок керівництво;
- організувати доставку і супровід потерпілого в медпункт;
- зберігати до початку розслідування обстановку на місці події і стан устаткування такими, якими вони були в момент нещасного випадку (якщо це не загрожує життю і здоров'ю людей або збереженню обладнання).

Таким чином, на ЧАЕС забезпечена надійна система поведження з твердими радіоактивними відходами, яка забезпечує безпеку персоналу та навколишньому середовищу.

ВИСНОВКИ

1. Утворення радіоактивних відходів є невід'ємною частиною функціонування промисловості, діяльності наукових установ, медичних закладів, об'єктів енергетики. Найбільша кількість таких відходів припадає на діяльність АЕС, в тому числі на процедуру безпечного зняття Чорнобильської атомної електростанції з експлуатації.

2. Класифікація радіоактивних відходів відрізняється в різних країнах світу. В Україні прийнята власна класифікація, яка відрізняється від американської та європейської, при цьому відповідає міжнародним стандартам.

3. На Чорнобильській АЕС створена життєздатна та ефективна стратегія поводження з радіоактивними відходами, а саме використовуються такі методи зберігання рідких радіоактивних відходів як іммобілізація.

4. Оцінка фізико-хімічних показників радіоактивної води до і після її очищення на установці СВО-4 показала відповідність очищеної води нормативній документації. Встановлено, що ефективність очищення від електролітів становить 98,0%.

Список використаних джерел

1. Клименко М. О., Клименко О. М., Клименко Л. В. Радіоекологія : підручник. Рівне: НУВГП, 2020. 304 с.
2. Іванов Є. Радіаційна екологія: Навчально-методичний посібник. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2011. 217 с.
3. Про загальні засади подальшої експлуатації і зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблоку цієї АЕС на екологічно безпечну систему: Закон України від 11.12.1998 № 309-XIV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/309-14#Text> (дата звернення 07.12.2023).
4. Канівець Л.А. Правове забезпечення збереження природних екосистем і видів у Чорнобильській зоні відчуження. Правова позиція. № 2 (31). 2021. С. 113-118. URL: <https://legalposition.umsf.in.ua/archive/2021/2/22.pdf>
5. Чорнобильська катастрофа. Актуальні проблеми, напрямки та шляхи їх вирішення: зб. праць учасників Міжнародної науково-практичної конференції 22-23 квітня 2021 року. Житомир: Поліський університет, 2021. 212 с.
6. Про затвердження державних санітарних правил «Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України»: наказ Міністерства охорони здоров'я від 02.02.05 № 54.
7. Мала гірнича енциклопедія: у 3т. / за ред. В.С. Білецького. Донецьк: Донбас, 2007. Т. 2, 670 с.
8. Стерилізація інструментарію медичного призначення: методичні вказівки для самостійної роботи лікарів-інтернів з дисципліни «Епідеміологія» / упоряд.: Т.О. Чумаченко, М.В. Райлян, Ю.І. Поливянна та ін. Харків: ХНМУ, 2020. 32 с.
9. United States Nuclear Regulatory Commission «Radioactive Waste»: веб-сайт. URL: <https://www.nrc.gov/waste.html> (дата звернення 07.12.2023)
10. Про загальнодержавну цільову екологічну програму поводження з радіоактивними відходами: Закон України від 17.09.2008 URL: <https://www.president.gov.ua/documents/516-vi-8036>

11. Про комплексне вирішення проблем поводження з радіоактивними відходами у зоні відчуження у зв'язку з підготовкою до зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС / С. Ю. Саверський, В. І. Холоша, С. Ю. Саверський та ін. Бюлетень екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. К.: Чорнобильінтерінформ. №16.
12. Окрушко С. Є., Гусак С. В. Поводження з радіоактивними відходами на Хмельницький АЕС. Наука в інформаційному просторі: збірник тезисів ІХ Міжнарод. науко-практич. Інтернет-конф. 10–11 жовтня 2013 г. URL: https://www.confcontact.com/2013-nauka-v-informatsionnom-prostranstve/eg2_okrushko.htm
13. Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 08.11.2017 № 820-р
14. Лико Д.В., Костолович М.І., Войтович О.П. Радіоактивні відходи: технології утворення, поводження, утилізація. Навчальний посібник. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2016. 204 с.
15. Cochran John R. Classification of Radioactive Waste. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1368832>.
16. Radioactive Waste Management (*Updated January 2022*). URL: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx>
17. USA department energy office ecological management URL: <https://www.energy.gov/em/articles/nuclear-regulatory-commissions-low-level-radioactive-waste-classifications>
18. IAEA Safety Standards URL: https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1419_web.pdf
19. Euratom: Commission Recommendation of 15 September 1999 on a classification system for solid radioactive waste (SEC(1999) 1302 final) URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A51999SC1302>

20. UK Radioactive Waste Inventory. What are the main waste categories? URL: <https://ukinventory.nda.gov.uk/about-radioactive-waste/what-is-radioactivity/what-are-the-main-waste-categories/>
21. Класифікація для забезпечення належного поводження з радіоактивними відходами URL: https://radioactivity.eu.com/radioactive_waste/waste_classification
22. Proposal for a COUNCIL DIRECTIVE on the management of spent fuel and radioactive waste URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX:52010PC0618>.
23. Класифікація радіоактивних відходів. URL: <https://kpmiskteplokomunenergo.info-gkh.com.ua/news/509>
24. Безпека атомних станцій. Поводження з радіоактивними відходами / А.В. Носовський, З.М. Алексєєва, Г.П. Борозенець та ін. за ред. А. В. Носовського К.: Техніка, 2007. 368 с.
25. Закон України «Про поводження з радіоактивними відходами» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/255/95-%D0%B2%D1%80#Text>
26. Finocchiaro P. Providing better radiation monitoring for nuclear waste. Physical Sciences, 2022. URL: <https://researchoutreach.org/articles/providing-better-radiation-monitoring-nuclear-waste/>
27. Об'єднана конвенція про безпеку поводження з відпрацьованим паливом та про безпеку поводження з радіоактивними відходами від 5 вересня 1997 року URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_335#Text
28. Декларація Конференції Організації Об'єднаних Націй з проблем оточуючого людину середовища від 16 червня 1972 року. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/declarations/declarathenv.shtml
29. Суєтнов Є. П. Декларація Ріо-де-Жанейро щодо навколишнього середовища та розвитку (1992). Велика українська юридична енциклопедія : у 20 т. Харків, 2018. Т. 14: Екологічне право. С. 189–190. URL: <https://dspace.nlu.edu.ua/jspui/handle/123456789/18635>

30. Базельська конвенція про контроль за транскордонним перевезенням небезпечних відходів та їх видаленням від 22 березня 1989 року. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_022#Text
31. Стратегія поводження з радіоактивними відходами в Україні: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 19 серпня 2009 р. № 990-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/990-2009-%D1%80#Text>
32. Approaches to characterization of radioactive waste in Ukraine at interrelated steps of their management / I. Iarmosh, S. Kondratiev, L. Kuechler et al. Ядерна та радіаційна безпека, 2020. № 1(85). С. 40-48.
33. Магда А. Основні міжнародно-правові принципи поводження з радіоактивними відходами. Актуальні проблеми міжнародних відносин, 2011. Вип. 95(1). С. 122–123
34. Аналіз аспектів безпеки захоронення відпрацьованих джерел іонізуючого випромінювання / О.В. Токаревський, К.В. Фузік, С.М. Кондратьєв та ін. Ядерна та радіаційна безпека. 2020. № 2(86). С. 72 – 82.
35. National Report On Compliance with Obligations under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, KYIV, 2017 URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/national_report_of_ukraine_for_the_6th_review_meeting_-_english.pdf
36. Neslen A. Nuclear waste stored in «shocking» way 120 miles from Ukrainian front line. The Gardian. 13 May, 2015. URL: <https://www.theguardian.com/environment/2015/may/06/nuclear-waste-stored-in-shocking-way-120-miles-from-ukraine-front-line>
37. Chernobyl waste processing operations resume. World Nuclear News. 24 August, 2022 URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Chernobyl-waste-processing-operations-resume>
38. Ojovan M.I., Lee W.E. An Introduction to Nuclear Waste Immobilization. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK, 2005. 361 p.

39. Yudinsev S. Immobilization of High-Level Waste: Analysis of Appropriate Synthetic Waste Forms. National academies press. 2005. P. 209-223. URL: <https://nap.nationalacademies.org/read/11320/chapter/23>
40. Ojovan M. Materials for Nuclear Waste Immobilization. 2020. URL: https://www.academia.edu/93382407/Materials_for_Nuclear_Waste_Immobilization
41. Державний комітет ядерного регулювання України НАКАЗ № 160 від 25.10.2004 URL: https://zakononline.com.ua/documents/show/94749__94749
42. Сердюк В.Р., Христич О.В. Використання бетелу-м для іммобілізації рідких радіоактивних відходів. Науково-технічний збірник «Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві». 2008. Вип. 5. С. 50-54. URL: <https://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/10/10>.
43. Переробка небезпечних і радіоактивних відходів із використанням плазмових технологій / В.А. Жовтянський, С.В. Петров, В.М. Орлік та ін. Екологічні науки, 2018. 2(21). С. 50-58.
44. Combined methods for liquid radioactive waste treatment. Final report of a coordinated research project 1997–2001, IAEA, February 2003, p. 8. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1336_web.pdf
45. Книш Є. П. Особливості електророзрядної технології для очищення техногенно забруднених рідин : магістерська дис. : 153 Мікро- та наносистемна техніка. Київ, 2019. 109 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30675>
46. Очищення стічних вод, що містять радіоактивні домішки. URL: <http://bibliograph.com.ua/spravochnik-109-kanalizacia/127.htm>.
47. База патентів України Спосіб очищення води від радіонуклідів URL: <https://uapatents.com/4-59098-sposib-ochishhennya-vodi-vid-radionuklidiv.html>.
48. База патентів України Спосіб очищення вод, забруднених важкими металами, радіонуклідами, у присутності органічних речовин різної природи – URL: <https://uapatents.com/4-49141-sposib-ochishhennya-virobnichikh-stichnikh-vod.html>
49. Valdovinos V., Monroy-Guzman F., Bustos E. Treatment methods of handling radioactive waste and their electrochemical application. 2014. P. 14-16. URL:

<https://www.intechopen.com/chapters/46254>

50. Penzin R., Sarychev, G. Innovative Process for Comprehensive Treatment of Liquid Radioactive Waste. URL:

<https://archivedproceedings.econference.io/wmsym/2012/papers/12551.pdf>

51. Abdel Rahman R., Ibrahim H., Hung Y. Liquid Radioactive Wastes Treatment: A Review, MDPI, 2011. URL:

https://www.researchgate.net/publication/215510751_Liquid_Radioactive_Wastes_Treatment_A_Review

52. Walling S., Um W., Corkhill C., Hyatt N. Fenton and Fenton-like wet oxidation for degradation and destruction of organic radioactive wastes, Nature / npj Materials Degradation, 2021 URL: <https://www.nature.com/articles/s41529-021-00192-3>

53. Ma H., Shen M., Tong Y., Wang X. Radioactive Wastewater Treatment Technologies: A Review, National Library of Medicine, 2023 URL: https://uccenvironmental.com/water/?gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMI2NqD2Z_ggMV_VWRBR3bkgTrEAAYASAAEgLQ_PD_BwE

54. Кобзар О., Шевченко І. Радіаційна безпека: питання теорії та практики як основа еколого-економічних досліджень. Механізм регулювання економіки. 2009. № 2. С. 30 – 37. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/14040489.pdf>

55. Державне підприємство «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» Поводження з радіоактивними відходами при експлуатації АЕС ДП «НАЕК «Енергоатом» (станом на 31.12.2020). URL: <https://www.energoatom.com.ua/parts/pdf-file/2020.pdf>

56. Аналітична хімія / В. В. Болотов, О. М. Свечнікова, С. В. Колісник та ін. За ред. В.В. Болотова. Х.: Вид-во НФаУ, 2004. С. 268 - 271.

57. ДСП ЧАЕС. URL: <https://chnpp.gov.ua/ua/activity/development-of-raw/povodzhennia-z-radioaktyvnymy-vidkhodamy>.

58. Калита О.М., Курмакова І.М. Визначення ступеня очищення рідких радіоактивних відходів атомних електростанцій / Крок у науку: дослідження у галузі природничо-математичних дисциплін та методик їх навчання: Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною

участю студентів, аспірантів і молодих учених (7 грудня 2023 р., м. Чернігів).
Чернігів : НУЧК імені Т. Г. Шевченка, 2023. С. 34-35.

59. Шкавро З. М., Антонюк Н. Г. Теорія та практика використання коагулянтів у технології водоочищення. Наукові записки, 2014. Т.157. С. 65-78. URL:

<https://core.ac.uk/download/pdf/149241528.pdf>

60. Ярошенко К.К., Шабанов М.В. Ефективність коагуляційного очищення водних стоків керамічних виробництв. URL:

<http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/32260/11-Yaroshenko.pdf?sequence=1>



Сертифікат учасника

ЦЕЙ СЕРТИФІКАТ СВІДЧИТЬ ПРО ТЕ, ЩО

Калита Олександр Михайлович

БРАВ(ЛА) УЧАСТЬ У

**ВСЕУКРАЇНСЬКІЙ НАУКОВО-ПРАКТИЧНІЙ КОНФЕРЕНЦІЇ
З МІЖНАРОДНОЮ УЧАСТЮ
СТУДЕНТІВ, АСПІРАНТІВ І МОЛОДШИХ УЧЕБНИХ «Крок
у науку: дослідження у галузі природничо-математичних
дисциплін та методик їх навчання»**

**7
ГРУДНЯ
2023**

Третяк Олександр Петрович
декан природничо-математичного
факультету НУЧК ім. Т. Г. Шевченка,
кандидат біологічних наук, професор

6 годин, 0,2 кредити вст

ПМФ-№56

Природничо-математичний факультет

Додаток до Сертифікату учасника

Достигнув результату

РН 1. Удосконалено знання сучасних тенденцій розвитку природничо-математичних, біологічних дисциплін та методик їх викладання

РН 2. Розвинено вміння організувати педагогічну діяльність на комп'ютерній платформі

РН 3. Розвинено вміння реалізувати сукупні програми призначення та біологічної науки з використанням сучасних підручників, динамічних методів, форм і технологій

РН 4. Розвинено вміння проєктувати власну програму професійно-особистісного зростання

РН 5. Удосконалено вміння застосування інформаційно-комунікаційних технологій викладання природничо-математичних та біологічних дисциплін