

Національний університет «Чернігівський колегіум» ім. Т. Г. Шевченка

Природничо-математичний факультет

Кафедра хімії, технологій і фармації

Кваліфікаційна робота

освітній ступінь: магістр

на тему

РАДІАЦІЙНА БЕЗПЕКА НА АЕС ТА ОБ'ЄКТАХ ЗБЕРІГАННЯ ЯДЕРНОГО ПАЛИВА

Виконав:

студент 6 курсу, групи 62

спеціальності 102 «Хімія»

Холкін Дмитро Геннадійович

Науковий керівник:

доцент кафедри хімії, технологій та

фармації, кандидат біологічних наук

Смольський О.С.

Роботу подано до розгляду « 9 » 01 2024 р.

Студент

Холкін

Холкін Д.Г.

Науковий керівник

Смолюцький

СМОЛЬСЬКИЙ О.С.

Рецензент

Друш

Лукаш О.В.

Кваліфікаційна робота розглянута на засіданні кафедри хімії, технологій та фармації. Протокол № 8 від «10» січня 2024 р.

Студент допускається до захисту даної роботи в екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри

Курмакова
(підпис)

Курмакова І.М.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Радіаційні аварії визначаються Міжнародним агентством з атомної енергії як події, що призвели до значних наслідків для людей, навколишнього середовища або об'єкта та пов'язані з втратою контролю над джерелом іонізуючого випромінювання внаслідок несправності обладнання, нерациональних дій персоналу, стихійних лих або інших причин, що може призвести до опромінення людей понад встановлені норми або до радіоактивного забруднення навколишнього середовища.

Мета даного дослідження – розглянути фізико-хімічні та технологічні причини радіаційних аварій на АЕС та питання радіаційної безпеки на об'єктах зберігання відпрацьованого ядерного палива.

В ході виконання роботи проаналізовані технологічні та фізико-хімічні причини аварії на ЧАЕС 26 квітня 1986 р., показано, що підключення системи очищення водних басейнів СВЯП-1 ДСП «Чорнобильська АЕС» передбачено за результатами хімічного та гамма-спектрометричного аналізу.

Експериментально за даними радіометричного аналізу підтверджено що вода об'єктів зберігання відпрацьованого ядерного палива СВЯП-1 знаходиться у допустимих нормативними вимогами межах та не перевищує критичних показників питомої активності.

Автором роботи на основі технічної, нормативної та поточної документації запропоновані технологічні та фізичні засоби мінімізації впливу радіоактивного випромінювання під час поводження з компонентами відпрацьованого ядерного палива матеріалами на СВЯП-2 ДСП «Чорнобильська АЕС».

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. РАДІАЦІЙНІ АВАРІЇ НА АЕС ТА ПЕРЕДУМОВИ ЇХ ВИНИКНЕННЯ.....	9
1.1. Поняття радіаційних аварій та їх історія.....	9
1.2. Недостатнє дотримання та зневажливе ставлення до радіаційної безпеки як причина аварій на АЕС.....	14
1.3. Конструктивні та технологічні недоліки атомних реакторів як чинник радіаційних аварій.....	20
РОЗДІЛ 2. ЕКОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ РАДІАЦІЙНИХ АВАРІЙ ТА ЇХ НАСЛІДКИ	27
2.1. Радіаційні аварії та наслідки для навколишнього природного середовища та людської інфраструктури.....	27
2.2. Хімічні та біологічні фактори, що супроводжують радіаційні аварії.....	30
2.3. Стан Чорнобильської зони відчуження понад 37 років з моменту аварії на ЧАЕС 26 квітня 1986 р.....	34
РОЗДІЛ 3. СИСТЕМА РАДІАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ТА КОНЦЕПЦІЯ КОМПЛЕКСНОГО ВІДНОВЛЕННЯ І РОЗВИТКУ РАДІАЦІЙНО ЗАБРУДНЕНИХ ТЕРИТОРІЙ.....	40
3.1. Ліквідація наслідків радіаційних аварій.....	40
3.2. Радіаційний моніторинг зон, де відбулись радіаційні катастрофи.....	44
РОЗДІЛ 4. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	48
РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	50
5.1. Особливості зберігання РАВ на СВЯП-1 ДСП «Чорнобильська АЕС».....	50
5.2. Аналіз радіаційної безпеки об'єктів зберігання СВЯП-1 ДСП «Чорнобильська АЕС».....	54

5.3. Особливості зберігання РАВ на СВЯП-2 ДСП «Чорнобильська АЕС».....	57
ВИСНОВКИ.....	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	62
ДОДАТКИ.....	71

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АЕС** - атомна електростанція
- АР** - атомний реактор
- БВ** – басейн витримки
- БВК** – басейн витримки касет
- БЩК** – блок щиту керування
- ВЗТЧ** – відсік зберігання транспортних чохлаів
- ВТВЗ** – відпрацьована тепловидільна збірка
- ВЯП** – відпрацьоване ядерне паливо
- ГПС** – гострий променевий синдром
- ЗСР** – зона суворого режиму
- КЯР** – комісія з ядерного регулювання
- ЛДЖ** – лінія додаткового живлення
- МАГАТЕ** - Міжнародне агентство з атомної енергії
- МПТ** – місцева променева травма
- РА** - радіаційна аварія
- РАВ** - радіоактивні відходи
- РАС** - радіаційні аварійні ситуації
- РБ** - радіаційна безпека
- РВПК** - реактор великої потужності канальний
- РЗ** - радіаційне забруднення
- СВЯП** – сховище відпрацьованого ядерного палива
- СРТВ** – сховище радіоактивних твердих відходів
- ТВЗ** – тепловидільна збірка
- ЧАЕС** – Чорнобильська атомна електростанція
- ЧТП** – чохол транспортний передаточний

ВСТУП

Радіаційні аварії та їх наслідки залишили значний й незгладимий слід в історії технологічного прогресу людства. Важкі спогади про Чорнобиль і Фукусіму слугують гострим нагадуванням про жахливі наслідки, які можуть спричинити інциденти, пов'язані з радіацією для людей та навколишнього середовища. З розвитком глобального енергетичного ландшафту, важливим компонентом якого залишається ядерна енергетика, нагальна потреба у вирішенні проблем радіаційної безпеки стає все більш актуальною [18].

Актуальність роботи полягає у дослідженні радіаційних аварій та питань радіаційної безпеки на атомних електростанціях, радіаційно небезпечних об'єктах та їх наслідків для людства і довкілля важко переоцінити, адже ці інциденти мають далекосяжні наслідки, впливаючи на здоров'я населення, екологічну стабільність та добробут суспільства. Розуміння тонкощів радіаційних аварій та їхніх наслідків має вирішальне значення, оскільки світ намагається вирішити проблему виробництва чистої, сталої енергії, одночасно зменшуючи ризики, пов'язані з ядерними технологіями.

Слід звернути увагу, що постійна експлуатація атомних об'єктів призводить до утворення значної кількості радіоактивних відходів, які вимагають функціонування місць їх зберігання та переробки. На території ДСП «Чорнобильська АЕС» з 1986 р. функціонує сховище відпрацьованого ядерного палива СВЯП-1 «мокрого типу» та нещодавно запущене в експлуатацію (червень 2021 р.) СВЯП-2 «сухого типу», тому питання радіаційної безпеки на робочому майданчику ЧАЕС, незважаючи на її зупинення, залишається дуже актуальним. Останнє пов'язане з необхідністю термінової утилізації тепловидільних збірок 1-3 реакторів ЧАЕС, оскільки ще у 2000 р. було прийняте рішення про призупинення роботи усіх реакторів, що, на жаль, унеможливило ЧАЕС виробництва електроенергії, що в умовах сьогодення є дуже важливим аспектом енергетичної безпеки України.

Мета дослідження – розглянути фізико-хімічні та технологічні причини радіаційних аварій на АЕС та питання радіаційної безпеки на об'єктах зберігання відпрацьованого ядерного палива.

Об'єкт дослідження – радіаційна безпека на АЕС та об'єктах зберігання відпрацьованого ядерного палива.

Предмет дослідження – фізико-хімічні та радіологічні особливості водних об'єктів зберігання відпрацьованого ядерного палива ДСП «ЧАЕС».

Для досягнення мети були поставлені наступні наступних **завдання**:

1. Проаналізувати об'єктивні та суб'єктивні причини аварії на ЧАЕС 26 квітня 1986 р.
2. Охарактеризувати особливості системи аварійного та радіаційного контролю на СВЯП -1.
3. Описати показники питомої радіоактивності водних об'єктів зберігання відпрацьованого ядерного палива СВЯП-1 ДСП «Чорнобильська АЕС» протягом 2023 р.
4. Запропонувати радіаційно безпечний алгоритм поводження з компонентами сухого відпрацьованого ядерного палива на СВЯП-2 ДСП «Чорнобильська АЕС».

Матеріали роботи представлені на Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю студентів, аспірантів і молодих учених (7 грудня 2023 р., м. Чернігів):

Публікації:

Холкін Д. Г., Смольський О. С. Радіаційні аварії на АЕС та їх фізико-хімічні особливості. *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. 82-84.*

РОЗДІЛ 1

РАДІАЦІЙНІ АВАРІЇ НА АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ ТА ПЕРЕДУМОВИ ЇХ ВИНИКНЕННЯ

1.1. Поняття радіаційних аварій та їх історія.

Радіаційні аварії визначаються Міжнародним агентством з атомної енергії (далі МАГАТЕ) як події, що призвели до значних наслідків для людей, навколишнього середовища або об'єкта [28]. Ці аварії можуть призвести до опромінення персоналу та навколишнього середовища високими рівнями радіації, а також спричинити викид радіоактивності в навколишнє середовище.

Існує два типи радіаційних аварій:

1. аварії з обмеженими масштабами;
2. аварії з розсіяним іонізуючим випромінюванням.

Аварії з обмеженими масштабами - це аварії, в яких може постраждати лише кілька людей, але при цьому не відбувається викиду радіоактивності в навколишнє середовище. Прикладом цього є аварія з обмеженим викидом радіації за межі майданчика і дуже малим викидом радіоактивності, що сталася на АЕС «Токаймура» в 1999 році під час виробництва палива зі збагаченого урану.

Аварії з розсіяним іонізуючим випромінюванням спричинені незакритими або пошкодженими джерелами іонізуючого випромінювання. Забруднення може бути зовнішнім або внутрішнім (наприклад, домішки у радіоактивному паливі або внутрішній системи охолодження) [39]. Прикладом аварії з розсіяним іонізуючим випромінюванням є загальновідома Чорнобильська катастрофа 1986 року, яка призвела до викиду радіоактивних матеріалів у навколишнє середовище.

Чимало досліджень виділяють спільні риси для будь-яких радіаційних аварій, але є декілька визначень для цього явища. Вище ми з прикладами розібрали вже одне розібрали, наведемо ще декілька трактувань.

Радіаційна аварія - подія, пов'язана з втратою контролю над джерелом іонізуючого випромінювання внаслідок несправності обладнання, нерациональних дій персоналу, стихійних лих або інших причин, що може призвести до опромінення людей понад встановлені норми або до радіоактивного забруднення навколишнього середовища. Основними вражаючими факторами таких аварій є радіаційне опромінення та радіоактивне забруднення. Аварії можуть супроводжуватися вибухами та пожежами. Радіаційне опромінення людини призводить до порушення життєдіяльності різних органів (насамперед кровотворної системи, нервової системи, шлунково-кишкового тракту) та розвитку променевої хвороби під впливом іонізуючого випромінювання. Радіоактивне забруднення викликається впливом альфа-, бета- і гамма-іонізуючого випромінювання і обумовлено викидом елементів, що не вступили в реакцію, і продуктів ядерного поділу (радіоактивний шлак, пил, ядерні уламки) [16].

Існують різні типи радіаційних аварій і вони також залежить від того, який тип опромінення присутній від різних радіонуклідів. Типи радіаційного випромінювання включають альфа-, бета- та гамма-промені. Кожний з цих типів випромінювання має свої особливості та вплив на живі організми:

1. *Альфа-промені* - потік альфа-частинок, тобто ядер гелію-4, утворюється при альфа-розпаді та потрійному розпаді. Альфа-промені мають велику іонізуючу здатність і можуть спричинити серйозні радіаційні пошкодження, включаючи опіки, променеви хворобу та рак.

2. *Бета-промені* - потік електронів або позитронів, що виникає при бета-розпаді ядер. Бета-промені також можуть спричинити важкі захворювання, включаючи рак.

3. *Гамма-промені* - фотони високої енергії, що утворюються при радіоактивному розпаді. Гамма-промені можуть призвести до важких захворювань, таких як опіки, променева хвороба та рак.

Випромінювання радіоактивних елементів може спричинити важкі радіаційні пошкодження, тому важливо захищати людей від впливу радіації. В Україні діяльність стосовно захисту людини від впливу іонізуючого випромінювання регламентується.

Зазначимо, що радіаційні аварії мають певні, здебільшого негативні, наслідки про що ми детально поговоримо у Розділі 2. Так, викиди радіаційних матеріалів під час РА мають такі наслідки як забруднення територій, руйнування екосистем та несуть шкоду здоров'ю людини. Центр з контролю та профілактики захворювань (CDC) визначають місцеву променеви травму (МПТ) як «гостре опромінення (понад 1000 рад) невеликої, локалізованої частини тіла. Більшість локальних променевих ушкоджень не призводять до смерті. Однак, якщо опромінення відбувається від проникаючої радіації (нейтрони, рентгенівське або гамма-випромінювання), можуть бути пошкоджені внутрішні органи і виникнути деякі симптоми гострого променевого синдрому (ГПС), включаючи смерть. Місцеве променеви ураження завжди супроводжується пошкодженням шкіри, і може знадобитися пересадка шкіри або інше хірургічне втручання» [7]

- РА можна назвати по-іншому і в зарубіжній науковій літературі і пресі можуть зустрічатись інші терміни, але зі практично з однаковим змістом. Так, наприклад, є такий термін, як *радіаційні аварійні ситуації* (РАС). Це нестандартні ситуації або події, які вимагають негайних дій для зменшення радіаційної небезпеки або її негативних наслідків для життя, здоров'я, майна або довкілля.

РАС можуть бути наслідком неправильного використання радіоактивних джерел у промислових, медичних або дослідницьких цілях, випадкового опромінення від неконтрольованих (покинутих, загублених або викрадених) джерел іонізуючого випромінювання, аварій під час транспортування

радіоактивних матеріалів, а також можуть поєднуватися зі звичайними аварійними ситуаціями (пожежа або викид хімічних речовин) [71].

Отже, радіаційні аварії та радіаційні інциденти можна визначити як події, що призвели до значних наслідків для людей, навколишнього середовища або об'єкта, або ситуації, пов'язані з опроміненням від радіоактивного джерела. Вони можуть бути наслідком різних причин, таких як аварії під час транспортування радіоактивних матеріалів, неправильне використання радіоактивних джерел, незапечатані або пошкоджені джерела іонізуючого випромінювання. Але причини та наслідки РА ми детально розберемо у наступних розділах цієї роботи.

У сфері ядерної науки та технологій термін «радіаційні аварії» викликає асоціації зі складною та багатогранною сферою досліджень. Як науковці, ми прагнемо зрозуміти радіаційні аварії через прагнення розплутати хитросплетіння цих інцидентів, які часто відзначаються глибокими наслідками як для людства, так і для довкілля.

По суті будь-яка радіаційна аварія - це неочікувана та небажана подія, яка призводить до виходу іонізуючого випромінювання за встановлені межі безпеки. Іонізуюче випромінювання охоплює широкий спектр частинок і електромагнітних хвиль, включаючи альфа- і бета-частинки, гамма-промені та рентгенівське випромінювання. Ці види випромінювання мають достатню енергію, щоб вибивати електрони з атомів і молекул, викликаючи іонізацію і потенційно пошкоджуючи біологічні тканини.

Радіаційні аварії, пов'язані не тільки з АЕС. Ці інциденти відбуваються за межами атомних електростанцій і можуть бути пов'язані з різними джерелами радіації, такими як промислові опромінювачі, медичні прилади або навіть транспортні аварії, пов'язані з перевезенням радіоактивних матеріалів. Прикладами можуть слугувати аварія на АЕС Гоянія в Бразилії у 1987 році. Такі аварії можуть призвести до радіаційного опромінення, забруднення та значних зиків для здоров'я [15].

Історія радіаційних аварій налічує десятки зафіксованих випадків. Деякі були доволі незначні і їх наслідки сьогодні практично ліквідовані. А деякі відомі настільки, що про них зняли фільми та серіали. Подивимось хронологію подій і розберемо детально найвизначніші.

Радіаційні аварії траплялися протягом всієї історії людства від моменту запуску першого реактора, і ось деякі з найбільш значущих з них:

- У 1896 році Нікола Тесла цілеспрямовано піддав свої пальці рентгенівському опроміненню і незабаром повідомив, що це викликало гострі наслідки у вигляді опіків, які тоді ще не приписували як властивості рентгенівського випромінення [43].

- Однією з перших серйозних подій, яка висвітлила небезпеку іонізуючого випромінювання, стала справа «радієвих дівчат» - робітниць, які фарбували циферблати годинників фарбою на основі радію. Вони були проінструктовані використовувати губи для загострення пензлів, що призвело до високого рівня опромінення радієм і багатьох випадків раку [56].

- Під час аварії в Колумбусі, що сталася в Огайо впродовж 1974-1976 роками, апарат був відкалібрований на основі неправильної кривої розпаду, що призвело до надмірного опромінення 88 пацієнтів [49].

- У 1982 році втрачене джерело іонізуючого випромінювання в Баку, у тодішньому СРСР, призвело до п'яти смертельних випадків і 13 уражень пов'язаних з радіацією [72].

- У 1984 році радіаційна аварія в Марокко призвела до восьми смертельних випадків через переопромінення від втраченого джерела іридію-192.

- З 1985 по 1987 рік сталися аварії з Therac-25. Апарат для променевої терапії був задіяний у шести випадках, де пацієнти зазнали масивних передозувань радіації. Чотири смертельні випадки та два радіаційних ураження стали наслідком цього недбалого ставлення до радіаційного обладнання.

- У 1986 році в Україні сталася Чорнобильська катастрофа, яка вважається найгіршою ядерною аварією в історії. Вибух і пожежа на Чорнобильській

атомній електростанції викинули в атмосферу величезну кількість радіоактивних частинок, що призвело до багатьох смертей і довгострокових наслідків для здоров'я у десятків тисяч людей [72].

- У 1996 році під час променевої терапії в клініках Коста-Ріки загинули 13 людей та ще 114 пацієнтів отримали передозування радіації через несправність складного обладнання [34].

- У 2011 році в Японії сталася ядерна катастрофа на АЕС Фукусіма-1, спричинена потужним землетрусом і цунамі. Катастрофа призвела до викиду радіоактивних матеріалів і багатьох довгострокових наслідків для здоров'я людей та екології Японії в цілому.

До поняття радіаційних аварій слід додати фізичні та хімічні аспекти на АЕС, що включають процеси, які впливають на властивості матеріалів, такі як напруження, деформація, температура і фактори навколишнього середовища. Під час серйозної аварії на реакторі в гру вступають різні фізико-хімічні властивості, включаючи поведінку матеріалів і хімічні процеси, що відбуваються всередині станції.

Аварія на ЧАЕС 26 квітня 1986 р. призвела до руйнування активної зони реактора і викиду величезної кількості матеріалів, що вплинуло на властивості навколишнього середовища. Як бачимо, РА нагадують людству про важливість заходів безпеки при поводженні з радіоактивними матеріалами та радіаційно небезпечними об'єктами.

1.2. Недостатнє дотримання та зневажливе ставлення до радіаційної безпеки як причина аварій на АЕС

Дослідження у галузі ядерної енергетики на сьогодні є чисельними та багатофункціональними, що вимагається високими вимогами у даній сфері діяльності людини. Незважаючи на те, що за десятиріччя використання ядерних установок науковці та технологи виробили чіткі протоколи дії на будь-який

випадок та створили певні правила для забезпечення радіаційної безпеки технічний або людський чинник за рахунок недостатнього дотримання та нехтування радіаційною безпекою є однією з основних причин аварій на АЕС та радіаційно-небезпечних об'єктах.

Експлуатація атомних електростанцій характеризується як позитивними, так і негативними особливостями. З одного боку, вона забезпечує значне джерело чистої енергії, зменшуючи нашу залежність від викопного палива та сприяє зменшенню викидів оксидів вуглецю, азоту та сірки. З іншого боку, ризики, які пов'язані з ядерною енергією, дуже серйозні. При недостатньому дотриманні та нехтуванні заходами радіаційної безпеки наслідки можуть бути катастрофічними, як нам вже продемонструвала історія [14].

РБ - це не лише бюрократична формальність чи завищена обережність. Також це фундаментальний стовп, на якому стоїть ядерна промисловість. Невидимий, безшумний і потенційно смертельний характер іонізуючого випромінювання вимагає непохитної прихильності до безпеки. Не буде перебільшенням сказати, що життя людей, екосистеми та цілі регіони можуть бути безповоротно змінені, якщо нехтувати протоколами радіаційної безпеки.

З власної практики можу виділити такі першопричини, що ведуть до нехтування ядерною безпекою:

- ✓ Економічний тиск: одним з основних чинників нехтування безпекою є економічний тиск. Балансування між витратами на утримання та модернізацію систем безпеки і необхідністю отримання прибутку може призвести до відкладення технічного обслуговування, що фактично призводить до компрометації критично важливих заходів безпеки.
- ✓ Надмірна впевненість у конструкції АЕС: З часом сам успіх атомних електростанцій у запобіганні аваріям може породити самозаспокоєння. Це стається через постійне підвищення технічних і технологічних стандартів, що може призвести до небезпечної недооцінки потенційних ризиків.

- ✓ Недостатня підготовка і людські помилки: Ядерні об'єкти є складними і потребують висококваліфікованого персоналу. Нехтування постійним навчанням і недооцінка ролі людської помилки може призвести до аварій, яких можна було б уникнути.

Наслідки нехтування радіаційною безпекою яскраво проявляються в таких історичних аваріях, як Чорнобиль, Фукусіма та Три-Майл-Айленд. Загинули люди, громадяни були змушені покинути свої рідні помешкання, а навколишнє середовище було забруднене на сторіччя вперед. Економічні та соціальні втрати практично невимірні, а довгострокові наслідки для здоров'я продовжують переслідувати постраждалі регіони і сьогодні. Запобігання ядерним аваріям починається з суворої прихильності до безпеки на всіх рівнях, від операторів АЕС до регулюючих органів.

Подолання зневажливого ставлення до радіаційної безпеки та нехтуванням РБ можливо за наступними етапами:

1. *Безперервне навчання.* Постійне навчання та підвищення кваліфікації персоналу повинно бути пріоритетом. Людська помилка є важливим фактором нещасних випадків, а добре навчений персонал може зменшити ризики.

2. *Інвестувати в безпеку.* Адекватне фінансування заходів безпеки - це не просто вибір для підприємства, а й необхідність. Зрізати кути в питаннях безпеки - це гра, на яку не повинно йти жодне відповідальне суспільство.

3. *Прозоре звітування.* Необхідно постійно заохочувати культуру відкритості та прозорості в інформуванні про проблеми з безпекою на об'єктах АЕС. Викривачів слід захищати і цінувати за їх роль у запобіганні катастрофам.

4. *Регуляторна пильність.* Регуляторні органи повинні бути сильними, незалежними і мати достатні ресурси. Вони повинні активно співпрацювати з операторами станцій для забезпечення дотримання заходів безпеки.

5. *Залучення громадськості.* Громадськість має право знати про заходи безпеки, що застосовуються на ядерних установках. Поінформована

громадськість може притягнути до відповідальності операторів і регулюючі органи.

Зневажливе ставлення та недотримання радіаційною безпекою може бути причиною аварій на атомних електростанціях. Однак ризик аварій на атомних електростанціях вже сьогодні є низьким і знижується. На атомних електростанціях діють процедури безпеки та захисту, які ретельно контролюються Комісією ядерного регулювання. Аварія на атомній електростанції може призвести до викиду небезпечних рівнів радіації над певною територією.

Радіоактивні матеріали в шлейфі від атомної електростанції можуть осідати на різних поверхнях і опромінювати людей, які перебувають на відкритому повітрі, у погано захищеній будівлі, у продуктах харчування, воді чи через худобу. Радіоактивні матеріали також можуть потрапити всередину організму, якщо люди вдихають їх, їдять або п'ють щось забруднене. Люди, які живуть поблизу атомної електростанції і зазнають впливу радіації, можуть мати довгострокові наслідки для здоров'я, такі як рак [54].

За 60-річну історію цивільної ядерної енергетики сталося лише три серйозні аварії на атомних електростанціях, що становить понад 18 500 кумулятивних реакторних років у 36 країнах. До серйозних аварій на АЕС належать ядерна катастрофа на Фукусімі, Чорнобильська катастрофа, аварія на Три-Майл-Айленді та аварія на SL-1. Однак, було порівняно мало смертельних випадків, пов'язаних з аваріями на атомних електростанціях. Працівники атомних станцій не більш радіоактивні, ніж будь-хто інший. За винятком надзвичайних обставин, таких як аварія на АЕС, працівники отримують лише мінімальні дози опромінення [59].

Радіаційна безпека дійсно є критично важливим аспектом експлуатації АЕС як було вже зазначено вище. Будь-яка недостатня відповідність або недбалість у цій сфері може потенційно призвести до аварій. Важливо визнати, що аварії на АЕС є складними подіями, які можуть мати багато факторів, що сприяють їх

виникненню. Хоча недостатнє дотримання і нехтування радіаційною безпекою може бути одним з таких факторів, важливо розглянути більш широкий контекст причин аварій, щоб повністю зрозуміти повну картину, що буде зроблено в наступних частинах цієї роботи.

Атомні електростанції мають комплексні протоколи безпеки, що забезпечують захист працівників, населення та навколишнього середовища від радіаційної небезпеки. Ці протоколи передбачають суворе дотримання нормативних вказівок, регулярні перевірки, навчальні програми та використання передових систем безпеки. Наприклад, не дивлячись на війну у нашій державі, досі проводиться моніторинг радіаційного середовища на території Чорнобильської зони відчуження [9]. Однак людські помилки, несправності обладнання та непередбачувані обставини можуть іноді порушувати заходи безпеки й ставати непоправимими навіть впродовж десятиріч.

У випадках, коли має місце недостатнє дотримання норм радіаційної безпеки, дуже важливо оперативно вирішувати та виправляти ці проблеми. Це може включати посилення навчальних програм, підвищення культури безпеки, покращення технічного обслуговування обладнання, а також посилення нагляду та підзвітності як вже ми зазначили раніше.

Таким чином, галузь може постійно покращувати показники безпеки та мінімізувати ймовірність аварій. Варто зазначити, що ядерна енергетика в цілому прагне забезпечити найвищі стандарти безпеки. Уроки, винесені з минулих аварій, призвели до значного прогресу в заходах і правилах безпеки. Постійно докладаються зусилля, щоб винести уроки з цих інцидентів і розробити стратегії для запобігання їх повторенню.

Хоча недостатнє дотримання та нехтування радіаційною безпекою може сприяти аваріям на АЕС, життєво важливо враховувати всі фактори, що впливають на них. Прихильність галузі до постійного вдосконалення і суворих протоколів безпеки допомагає зменшити ризики, пов'язані з виробництвом ядерної енергії, забезпечуючи безпечну і надійну роботу АЕС.

Станом на сьогодні Запорізька, Рівненська та Хмельницька АЕС в Україні мають такі основні характеристики:

Запорізька АЕС

- найбільша атомна електростанція в Європі.
- має шість водо-водяних реакторів типу ВВЕР-1000, загальною потужністю 6 000 МВт.

Рівненська АЕС

- перша в Україні АЕС з реакторами типу ВВЕР-440 та ВВЕР-1000.
- має чотири енергоблоки: 1-й і 2-й енергоблоки - реактори типу ВВЕР-440, 3-й і 4-й енергоблоки - реактори типу ВВЕР-1000.
- загальна потужність станції становить 2830 МВт (2,83 ГВт).

Хмельницька АЕС

- розташована в північній частині Хмельницької області, за 350 кілометрів на захід від Києва, на оптимальній відстані від великих міст.
- вона має один реактор, який мав бути виведений з експлуатації у 2018 році, але отримав продовження терміну експлуатації до 2028 року.

Ці АЕС відіграють значну роль у виробництві енергії в Україні і підлягають суворим правилам безпеки та моніторингу.

На ймовірність аварії під час експлуатації реакторів РБМК можуть впливати різні фактори, такі як відключення електроенергії, відмова системи охолодження та ймовірність вибуху. Однак наявна інформація на сьогодні не містить конкретних цифр для цих ймовірностей оскільки Україна давно відмовилась від РБМК. Замість цього в ній розглядаються системи безпеки та особливості реакторів РБМК, які призначені для запобігання аваріям і пом'якшення їх наслідків.

До особливостей безпеки реакторів РБМК відносяться:

- повномасштабну модель ризику енергоблоку та вихідні дані для реактора;
- проектна аварія аналізу безпеки РБМК, якою є розрив однієї труби;

- частота серйозних аварій з пошкодженням активної зони становить $1,4 \cdot 10^{-5}$ на реакторний рік за різними підрахунками, що ще вважається прийнятно.

Ці заходи безпеки допомагають зменшити ймовірність аварій і тому важливо кількісно і якісно постійно оцінювати точне збільшення ймовірності, якби реактори РБМК були встановлені на сучасних українських АЕС та стримувати потенційні ризики, пов'язані з цими реакторами. РБМК з самого початку мали ряд суттєвих недоліків у порівнянні з реакторами типу ВВЕР.

Таким чином, недостатнє дотримання і нехтування радіаційною безпекою - це не абстрактні проблеми, а цілком реальні та потенційно руйнівні загрози. На шляху до сталого енергетичного майбутнього ми повинні пам'ятати, що безпека - це не вибір, а абсолютний імператив. Наслідки нехтування нею занадто серйозні, щоб їх можна було повністю передбачити чи назвати їх несуттєвими і таким чином не звертати на них уваги. В свою чергу, за кожен помилку доводиться платити. Але, ми можемо зменшити кількість фатальних помилок та тим самим забезпечити себе більш безпечно майбутнє.

1.3. Конструктивні та технологічні недоліки атомних реакторів як чинник радіаційних аварій

РА на рівному місці не виникають. І якщо, ми викреслимо природні чинники, такі як цунамі, шторми та торнадо, то в нас залишається людський фактор та конструктивні недоліки. Ці два чинники дуже просто та швидко неможливо описати, адже вони доволі багатоаспектні.

Людський фактор - це чинник, який проявляється через поведінку, діяльність та характеристики людини до, під час та після виникненні будь-яких аварій та інцидентів. У контексті радіаційних аварій людський фактор може сприяти помилкам у променевій терапії, мати численні непрогнозовані наслідки якщо мова заходить про радіаційні об'єкти [65]. Зараз наведемо деякі з людських факторів, які можуть призвести до радіаційних аварій:

1. Порушення комунікації між медичними працівниками, які беруть участь у променевій терапії або між співробітниками атомної електростанції, прискорювача частин і т.і.

2. Недостатня підготовка або досвід медичних працівників, які беруть участь у променевій терапії або співробітників АЕС, які керують, обслуговують та моніторять атомні реактори та прискорювачі, де є високий вміст радіоактивних матеріалів.

3. Втома або стрес персоналу АЕС, який вийшов на зміну у незадовільному стані через брак сну, наднормову працю тощо чи медичних працівників, залучених до променевої терапії.

4. Недотримання встановлених процедур або протоколів через необізнаність або неуважність до усіх пунктів.

5. Вихід з ладу обладнання через неналежне чи недостатнє технічне обслуговування або калібрування.

6. Недостатній рівень укомплектованості штату або ненормоване навантаження на працівників, через відбуваються проблеми з робочим графіком, завчасна втома людей і як наслідок – суттєві та інколи критичні помилки.

Розуміння та усунення цих людських факторів може допомогти запобігти радіаційним аваріям та підвищити безпеку працівників атомним об'єктів та пацієнтів й лікарів при променевій терапії.

Ядерні аварії та катастрофи трапляються з різних причин, включаючи системні недоліки, погане управління безпекою, низьку культуру безпеки, людські помилки та недоліки в конструкції реактора. Найсерйозніша ядерна аварія сталася 26 квітня 1986 року на Чорнобильській атомній електростанції в Україні, яка спричинила десятки смертельних випадки від радіації практично одразу, але більше десяти тисяч людей померли згодом від пов'язаних з радіацією хворобами. Аварія була спричинена проблемами в конструкції реактора та низькою культурою безпеки персоналу станції в умовах невдало

спланованого та проведеного експерименту. Розслідування після аварії привели до нової уваги до людського фактору в ядерній безпеці.

На західних реакторах не було необхідності вносити серйозні зміни в конструкцію, але системи управління і контрольні-вимірювальні прилади були значно вдосконалені, а підготовка операторів була переглянута. Аварія на АЕС Три-Майл-Айленд у 1979 році призвела до радикальних змін у плануванні аварійного реагування, підготовці операторів реактора, інженерії людського фактору, радіаційному захисті та інших сферах. Нові конструкції реакторів мають характеристики пасивної ядерної безпеки, але немає жодних гарантій, що реактори будуть спроектовані, побудовані та експлуатуватися повністю правильно [36].

Недоліки в конструкції ядерних реакторів призводили до радіаційних аварій у минулому. Деякі з найбільших ядерних аварій були спричинені помилками оператора або людськими помилками, тоді як інші були пов'язані з проблемами в конструкції реактора і низькою культурою безпеки. Так, наприклад, аварія на Чорнобильській АЕС була спричинена поєднанням недоліків у конструкції реактора та експлуатацією всупереч контрольному переліку випробувань на безпеку [70]. Аварія на АЕС Фукусіма була спричинена втратою електроенергії, що призвело до втрати функції охолодження. Аварія на Три-Майл-Айленді була спричинена поєднанням несправностей обладнання, проблем, пов'язаних з проектуванням, та людських помилок.

Загалом, ядерні реактори та електростанції мають складні функції безпеки та захисту, а ризик аварій є низьким і знижується. Однак ризик неконтрольованої ядерної реакції в ядерному реакторі, що призводить до масштабного забруднення повітря і води, завжди присутній [47]. Нові конструкції реакторів мають функції пасивної ядерної безпеки, які замінюють активні системи охолодження, що дозволило б запобігти аварії на Фукусімі.

Конструкція ядерних реакторів, як і людський фактор, також відіграє значну роль у виникненні радіаційних аварій. Важливо визнати, що аварії на ядерних

реакторах є багатогранними подіями, які часто є наслідком комбінації факторів, а не однієї причини. Недоліки в конструкції реактора можуть сприяти аваріям. Вони можуть включати недоліки в проектуванні систем безпеки, неадекватне врахування потенційних режимів відмов або недостатнє резервування критичних компонентів. Вирішення цих проблем вимагає постійних досліджень, розробок і впровадження вдосконалених конструкцій реакторів, а також ретельних оцінок і перевірок безпеки. Щоб запобігти нещасним випадкам, дуже важливо аналізувати минулі інциденти та робити висновки з них. Впровадження ефективних заходів безпеки, таких як вдосконалення навчальних програм, чіткі канали зв'язку та надійні системи нагляду і підзвітності, можуть допомогти зменшити вплив людського фактору на аварії. Крім того, ядерна промисловість повинна сприяти створенню середовища, яке заохочує повідомлення про можливі аварії та відкриту комунікацію для виявлення та усунення потенційних ризиків до їх безпосередньої ескалації.

Розберемо найвідоміших типи атомних реакторів. Вони мають різні модифікації, неоднакові назви в залежності від країни, де створено реактор, відрізняють потужністю та іншими характеристиками, але незважаючи на це, вони доволі схожі. Так, ті АР, які використовувались чи використовуються Україною та світом належать наступні:

- РВПК-1000;
- ВВЕР-1000;

На сьогодні, діючих реакторів типу РВПК-1000 (рос. РБМК-1000) в Україні немає. Чотири повністю добудованих таких реактори виробляли електроенергію на Чорнобильській АЕС до моменту катастрофи та до повного їх виведення з експлуатації у 2000 році. Саме тому такі реактори будуть чудовим прикладом для розгляду їх власних конструктивних недоліків.

Реактор РВПК-1000, а точніше четвертий енергоблок, на якому сталася Чорнобильська катастрофа, мав кілька конструктивних недоліків, що призвели до аварії. Ці недоліки включають:

1. розташування регулюючих стрижнів,
2. конструкцію захисної оболонки,
3. позитивний коефіцієнт порожнечі реактора [22].

Регулюючі стрижні мали конструктивний недолік - їх наконечники були виготовлені з графіту, що призвело до збільшення реактивності, і вони працювали все швидше і гарячіше, замість того, щоб зупинитися. Конструкція реактора РВПК була фундаментально несправною і мала вбудовану нестабільність, що ускладнювало контроль і зупинку в разі втрати або перегріву теплоносія. Реактор РВПК також мав неадекватні документи та інструкції, які були нечіткими і дозволяли персоналу радянських електростанцій обходити правила для досягнення економічних цілей, незважаючи на неадекватне або несправне обладнання. Після Чорнобильської катастрофи було вжито низку заходів для підвищення безпеки установок АР, включаючи зменшення коефіцієнта реактивності пустот і модернізацію регулюючих стрижнів графітовим витіснювачем, щоб запобігти потраплянню води з теплоносія в простір, що звільняється при виведенні стрижня [22].

Атомні електростанції – це об’єкти, які підпорядковуються суворим стандартам і протоколам безпеки для забезпечення захисту працівників і громадськості. Ці стандарти являють собою встановлені різними регулюючими органами та організаціями норми та правила поведінки з радіоактивними матеріалами й системами атомних реакторів. Деякі з стандартів і заходів безпеки включають:

- *Регуляторні вимоги:* Комісія ядерного регулювання США (КЯР) встановлює і забезпечує дотримання нормативних вимог до атомних електростанцій, включаючи стандарти захисту від радіації, проектні завдання з

контролю за викидами радіоактивних матеріалів, а також вимоги щодо негайного оповіщення та звітування про події.

- Міжнародні стандарти безпеки: МАГАТЕ встановило стандарти безпеки для контролю радіаційного опромінення та викидів радіоактивних матеріалів з метою обмеження ймовірності подій, які можуть призвести до втрати контролю над ядерним реактором, та пом'якшення наслідків таких подій.

Конструктивними недоліками ядерного реактора ВВЕР-1000, які досі працюють в Україні, ми можемо виділити наступні:

1. Заходи захисту операторів блочного щиту керування (БЩК) по суті не відрізняються від попередньої конструкції ВВЕР-440 моделі V213, яка не відповідає стандартам розвинених країн, наприклад, не відповідає нормативам прийнятими у США [51].

2. На відміну від усіх атомних станцій США і більшості західних країн, ВВЕР-1000 не мають на майданчику «центру технічної підтримки», який слугував би командним пунктом для стабілізації роботи станції в аварійній ситуації.

3. Конструкція корпусу реактора ВВЕР-1000 базується на перевіреному виробничому процесі та конструкційних матеріалах, але не зрозуміло, чи відповідає вона останнім стандартам безпеки, які постійно вдосконалюються під дією наукових відкриттів та покращення стандартів безпеки [46].

4. Конструкція ВВЕР-1000 має ще чимало суттєвих недоліків за американськими стандартами.

Реактор ВВЕР-1000 - це реактор з водою під тиском, який використовує легку воду як теплоносій і сповільнювач. ВВЕР-1000 є найпоширенішою конструкцією ВВЕР у світі, в експлуатації знаходиться 31 енергоблок, які напрацювали близько 500 реактор-років. Детальні геометричні характеристики, склад і властивості матеріалів для реактора ВВЕР-1000 доступні для верифікації та валідації нейтронних і теплогідравлічних кодів.

Фізичні та хімічні характеристики конструкційних матеріалів реактора ВВЕР-1000 мають важливе значення для забезпечення його безпечної та

ефективної експлуатації, але конкретні деталі про матеріали та їх характеристики можуть вимагати доступу до відповідної технічної документації та наукових досліджень [19].

Таким чином і конструкція ядерних реакторів і людський фактор суттєво впливають на ризик РА. Тому постійне вдосконалення конструкції реакторів і надаючи пріоритет всебічному навчанню та культурі безпеки, галузь може працювати над мінімізацією ризику аварій і забезпеченням безпечної експлуатації ядерних установок.

РОЗДІЛ 2

ЕКОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ РАДІАЦІЙНИХ АВАРІЙ ТА НАСЛІДКИ ТАКИХ ПОДІЙ

2.1. Радіаційні аварії та їх наслідки для навколишнього природного середовища та людської інфраструктури.

Радіаційне зараження ґрунту, вод, лісів, с/г угідь, забруднення житлових, промислових та інших зон, де мешкають люди – все це лише «верхівка айсбергу». Виділяють дуже багато факторів, що супроводжують викидом радіонуклідів під час радіаційних аварій, та особливо, впродовж подальших років, саме тому наслідки РА для навколишнього природного середовища та людської інфраструктури є надзвичайно небезпечними з екологічної, економічної та соціальної точок зору. А що вони собою являють ми зараз розберемо більш детально.

Радіаційні аварії можуть мати значні екологічні наслідки, які можуть варіюватися залежно від масштабу і тяжкості інциденту. Викид радіоактивних матеріалів у навколишнє середовище може призвести до різних короткострокових і довгострокових наслідків.

Негайні наслідки часто включають забруднення повітря, ґрунту, води і рослинності поблизу місця аварії. Це забруднення може становити ризик для здоров'я людей і тварин, а також порушити рівновагу в екосистемах. Ступінь забруднення навколишнього середовища залежить від таких факторів, як тип і кількість викинутих радіоактивних матеріалів, погодні умови та ефективність заходів з локалізації аварії. Довгострокові наслідки можуть бути складнішими і тривати роками або навіть сторіччями. Радіоактивні матеріали можуть накопичуватися в навколишньому середовищі і потрапляти в харчовий ланцюг, що призводить до потенційного опромінення людей і диких тварин. Забруднені території можуть потребувати значних зусиль з очищення та довготривалого

моніторингу для забезпечення захисту здоров'я населення та навколишнього середовища [12].

Окрім прямого впливу на навколишнє середовище, радіаційні аварії можуть також мати соціально-економічні наслідки. Для пом'якшення екологічних наслідків радіаційних аварій вирішальне значення мають швидкі та ефективні заходи реагування. Вони включають локалізацію та очищення, дезактивацію постраждалих територій і моніторинг рівнів радіації.

- Екологічні наслідки радіаційних аварій можуть бути серйозними і довготривалими. Як ми вже зазначили вище – викид радіоактивних матеріалів може забруднити повітря, воду, ґрунт і продукти харчування, що призведе до негативного впливу на здоров'я людей і біорізноманіття. Радіоактивні відходи, що утворюються на атомних електростанціях, можуть залишатися небезпечними протягом тисяч років. Радіоактивні матеріали в шлейфі від атомної електростанції можуть осідати і забруднювати людей, які перебувають на відкритому повітрі, будівлі, їжу, воду і худобу, а також можуть потрапляти всередину організму, якщо люди вдихають їх, або їдять чи п'ють щось радіаційно забруднене. Також спостерігається негативний вплив на екосистемні ресурси, включаючи забруднення води, ґрунтів та біогеоценоз [64].

Радіаційні аварії також впливають на людську інфраструктуру, що призводить до різних, переважно негативних, наслідків. Перерахуймо деякі з наслідків радіаційних аварій для людської інфраструктури:

- Ураження органів дихання та серцево-судинної системи: після огляду жертв радіаційних аварій 32 з 45 людей виявились з важким гострим променевим синдромом (ГПС) мали ураження органів дихання, а 20 – мали ураження серцево-судинної системи [30].

- Забруднення навколишнього середовища: радіаційні аварії можуть призвести до забруднення навколишнього середовища, що може вплинути на людську інфраструктуру, таку як будівлі, дороги та джерела води. Наприклад,

аварія на Чорнобильській АЕС призвела до забруднення великої площі землі, що потребувало значних зусиль з її реабілітації.

- Наслідки для здоров'я: радіаційні аварії можуть призвести до різних наслідків для здоров'я людей, таких як променева хвороба, рак і генетичні мутації. Ризики для здоров'я, безпосередньо пов'язані з радіаційним впливом, є низькими в Японії і надзвичайно низькими в інших країнах. Соціально-економічні та психологічні наслідки радіаційних страхів після ядерних аварій завдали значної шкоди як опроміненому, так і неопроміненому населенню.

- Економічні та соціальні наслідки: радіаційні аварії можуть мати значні економічні та соціальні наслідки, такі як евакуація та переселення людей, втрата майна, пошкодження інфраструктури та об'єктів. Аварія на Чорнобильській АЕС мала значні економічні та соціальні наслідки, включаючи переміщення людей і втрату оброблювальних земель [53].

- Економіко-екологічні наслідки: сільське господарство тісно пов'язане як з економікою, так і з екологією. Необроблювальні земельні ділянки після природнього відмирання с/г рослин стають місцем для бур'янів та дикої флори. Радіологічні або ядерні аварії ще можуть мати значні соціальні та психологічні наслідки для людей. Дослідження показали, що переживання ядерної катастрофи пов'язане з більш високим рівнем посттравматичного стресового розладу, депресії та тривоги [45].

Дослідженнями відмічено високі ризики хвороб серцево-судинної системи, передчасна втрата розумових здібностей, онкології та інші групи хвороб – не тільки наслідки радіації. Психосоматичні розлади в наш час все частіше стають причинами багатьох захворювань, при цьому не маючи достатнього «хіміко-біологічного підґрунтя». Це пояснюється тим, що людська психіка ініціює деякі хвороботворні процеси без видимого збудника [4].

2.2. Хімічні та біологічні фактори, що супроводжують радіаційні аварії

Радіаційні аварії - це не лише катастрофа, що має екологічні, економічні і соціальні значення. Це складне явище, що не може вивчати одна наукова галузь. РА мають аспекти, що вивчає фізика, медицина, хімія, біологія та інші науки. Оскільки, хімія і біологія дуже пов'язані науки і їх не можна розглядати зовсім окремо, то ми будемо зараз це вивчати.

Радіаційні аварії можуть спричинити як короткочасні, так і довготривалі ушкодження організму людини. Постраждалі від радіаційного інциденту потребують негайного медичного обстеження, діагностики та лікування радіаційних ушкоджень. Радіаційний вплив спричиняє як короткочасні пошкодження, такі як ураження шкіри та шлунково-кишкового тракту, так і довгострокові наслідки, такі як підвищений ризик розвитку злоякісних новоутворень та ураження центральної нервової системи. Залежно від величини дози, органів, що зазнали опромінення, та типу випромінювання, пошкодження клітин, спричинені іонізуючим випромінюванням, можуть викликати гострі захворювання, підвищувати ризик розвитку раку або і те, і інше.

Джерела радіаційного опромінення включають промислову стерилізацію, рентгенографію, вимірювання та медичну практику [33]. Серйозного опромінення, ймовірно, зазнають ті, хто працював з джерелами, або ті, хто має місцеві радіаційні ушкодження шкіри, які піддаються ризику розвитку гострого променевого синдрому, що вимагає медичної допомоги. Променева хвороба виникає в результаті радіації, що вивільняється під час вибуху або внаслідок радіоактивного забруднення ґрунту. У разі вибуху також слід очікувати психологічної травми, яка може включати дезорієнтацію, галюцинації, сплутаність свідомості, паніку, страх і клаустрофобію [57].

Радіаційні аварії можна розглядати як незвичайні події опромінення, які можуть призвести до високих доз опромінення кількох людей, а у випадку аварій на атомних станціях - великих груп населення. Зазвичай радіаційні аварії

стосуються людей, які працюють з радіоактивними матеріалами та джерелами рентгенівського випромінювання, такими як харчові опромінювачі, джерела промислової радіографії та рентгенівські апарати. Такі аварії трапляються рідко і, як правило, є наслідком недотримання процедур безпеки.

Хімічні реакції супроводжують радіаційні аварії в реакторі та навколишньому середовищі. Хімічні властивості матеріалів як всередині, так і зовні реактора впливають на дозу опромінення населення. Аварія на ЧАЕС призвела до викиду щонайменше 5% радіоактивної активної зони реактора в навколишнє середовище з осадженням радіоактивних матеріалів. Графіт і паливо розжарилися і спричинили низку пожеж, що призвело до основного викиду радіоактивності в навколишнє середовище. Загалом, більше половини якої припадає на біологічно інертні гази. Початкове опромінення на забруднених територіях було зумовлене короткоживучим йодом-131, а пізніше основну небезпеку становив цезій-137. Поблизу реактора відбулися фізіологічні та морфологічні зміни у ландшафті і живих істот, а також спостерігався негативний вплив на екосистемні рівноваги [32].

Енергія, яка виділяється в ядерних реакціях, на багато порядків перевищує енергію, що бере участь у хімічних реакціях. На відміну від хімічних реакцій, ядерні реакції не зазнають помітного впливу змін умов навколишнього середовища, таких як температура або тиск [40]. Двома основними типами ядерних реакцій є реакції ядерного розпаду та реакції ядерного перетворення. У реакції ядерного розпаду нестабільне ядро випромінює радіацію і перетворюється на ядро одного або декількох інших елементів. Утворені дочірні ядра мають меншу масу і меншу енергію (більш стабільні), ніж материнське ядро, що розпалося.

Радіоактивний розпад - це виділення енергії у вигляді іонізуючого випромінювання. Іонізуюче випромінювання може включати альфа-частинки, бета-частинки та гамма-промені. Радіоактивний розпад відбувається в нерівноважних атомах, які називаються радіонуклідами [31].

Радіоактивні елементи містяться в земній корі в природних умовах і присутні в деяких мінералах, що використовуються в різних галузях промисловості, таких як харчова, хімічна, металургійна, лікарняна, а також в ядерному паливному циклі [42]. Вплив радіації від цих елементів може мати шкідливий вплив на організм. У разі промислової аварії, пов'язаної з радіоактивними матеріалами, персонал і навколишнє середовище можуть зазнати впливу високих рівнів радіації.

Після РА може відбуватися мінералізація радіоактивних елементів у гірських породах і кремнеземних жилах. Хімічні перетворення цих елементів можуть призвести до часткової деградації сполуки, мінералізації або перетворення однієї сполуки в іншу. Цементування радіоактивних відходів є поширеним методом інкапсуляції, затвердіння та захоронення [42]. Наведемо кілька прикладів хімічних реакцій за участю радіоактивних елементів:

- Uranium-238 undergoes alpha decay to produce Thorium-234 and an alpha particle

$${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$$
- Radium-226 undergoes alpha decay to produce Radon-222 and an alpha particle

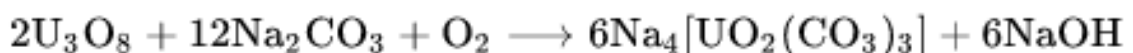
$${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + {}_2^4\text{He}$$
- Plutonium-239 undergoes alpha decay to produce Uranium-235 and an alpha particle

$${}_{94}^{239}\text{Pu} \rightarrow {}_{92}^{235}\text{U} + {}_2^4\text{He}$$

Це приклад розпаду 3 радіоактивних елементів, що найчастіше потрапляють в навколишнє середовище після РА

Уран та деякі інші радіоактивні елементи можуть окислюватись та мінералізуватись, що дозволяє їм тривалий час зберігатись на дні водойми, у ґрунті та на не дезактивованих будівлях.

Нам відомо, що у природі уран найчастіше зустрічається у вигляді оксиду U_3O_8 , який легко розчиняється в суміші карбонату та гідрокарбонату натрію, чим користуються для відокремлення від супутніх домішок:



Знаючи хімічні властивості уран та інших радіоактивних елементів – це допомагає нам правильно поводитись з ним на об'єктах атомної інфраструктури та розуміти, що слід робити, якщо уран чи схожі елементи потрапляють назовні.

Взагалі РА можуть мати значний вплив на біомолекули організмів людини, тварин та рослин. Іонізуюче випромінювання може завдати серйозної шкоди біологічним молекулам, розриваючи зв'язки або видаляючи електрони, порушуючи їхню структуру. Шкідливий вплив іонізуючого випромінювання включає високоорганізовану серію подій, які посилюються ендогенною сигналізацією і завершуються окислювальним пошкодженням ДНК, ліпідів, білків і багатьох метаболітів [52].

В залежності від величини дози, органів, що піддаються опроміненню, і типів випромінювання, пошкодження клітин, спричинені іонізуючим випромінюванням, можуть викликати гострі захворювання, підвищувати ризик розвитку раку або і те, і інше. Існує три загальні категорії ефектів, що виникають внаслідок впливу малих доз радіації: генетичні, соматичні та канцерогенні [63]. Радіаційне випромінювання діє на біологічні тканини на молекулярному рівні і завдає шкоди насамперед клітині та її складовим. Змінюючи молекули у високо впорядкованому середовищі клітини, іонізуюче випромінювання може порушувати життєдіяльність і пошкоджувати клітини.

2.3. Стан Чорнобильської зони відчуження понад 37 років з моменту аварії на ЧАЕС 26 квітня 1986 р.

Перед тим, як розглядати зону ЧАЕС – слід пройтись саме по її історії та нагадати найвідоміші історичні факти з хронології подій від 26 квітня 1986 до наших часів. Різні дослідники та історики виділяють різні періоди у цій катастрофі. Ми підійшли до цього теж з наукової точки зору та розписали дану катастрофу на такі часові проміжки:

1. Передумови катастрофи на ЧАЕС (до 26 квітня 1986);
2. Катастрофа на ЧАЕС в перші години після аварії;
3. Стан Чорнобильської зони відчуження в перші роки після катастрофи і до розпаду СРСР;
4. Стан Чорнобильської зони відчуження в періоді з 1991 по 2000 рік – до моменту повної зупинки генерації енергії;
5. ЧАЕС з 2000 року й по наші дні [5].

Передумови катастрофи на Чорнобильській АЕС впливає з вище розглянутих фактів стосовно конструктивних недоліків та людського фактора:

- Недоліки в конструкції реактора РВПК-1000;
- Відсутність знань персоналу про недоліки реактора;
- Низька «культура безпеки» персоналу ЧАЕС;
- Недостатня навченість персоналу;
- Проведення проектних випробувань;
- Неправильне проведення експерименту на 4-му реакторі;
- Недостатня увага до безпеки [13].

Хронологія аварії на Чорнобильській АЕС:

- 26 квітня 1986 року в 01 год. 23 хв. 40 с. за московським часом сталася аварія на енергоблоці № 4 Чорнобильської АЕС під час проведення проектних випробувань;

- 28 квітня 1986 року о 21:00 Всесоюзні ЗМІ передали перше офіційне повідомлення про катастрофу на Чорнобильській АЕС;

- У перші дні після аварії масштаби катастрофи були замовчані керівництвом ЧАЕС, але згодом пояснення причин аварії були переглянуті;

- До сьогодні продовжуються роботи з подолання наслідків Чорнобильської катастрофи, а також з запобігання подібним катастрофам;

- Мовчання радянської влади під час аварії на ЧАЕС тривало декілька днів, а перші офіційні повідомлення про катастрофу були передані Всесоюзними ЗМІ 28 квітня 1986 року [1].

Зона відчуження навколо Чорнобильської атомної електростанції була створена відразу після аварії 26 квітня 1986 року. У наступні роки після катастрофи докладалися зусилля для стримування поширення радіації та очищення забруднених територій. Будівництво саркофага над пошкодженим реактором було завершено в листопаді 1986 року. Зона відчуження була розширена до радіусу 10 км навколо станції, а місто Прип'ять було повністю покинуте [2]. Стан зони відчуження в роки, що передували 1991, характеризувався постійними зусиллями з очищення та стримування, а також зусиллями щодо запобігання несанкціонованому доступу до зони [3].

З 1991 по 2000 рік Чорнобильська зона відчуження продовжувала діяти, а ЧАЕС продовжувала працювати до 15 грудня 2000 року, до моменту коли вона припинила виробляти електроенергію. Протягом цього періоду зона залишалася забороненою територією через високий рівень радіації. ЧАЕС мала чотири реактори, але в цей період працювали лише три. Реактор №2 був зупинений у жовтні 1991 року через пожежу в машинному залі, спричинену несправністю генератора. Реактор №3 продовжував працювати до 2000 року, коли була зупинена вся електростанція. Наслідки Чорнобильської катастрофи продовжують залишатися предметом дискусій та досліджень у науковому середовищі і до сих пір [8].

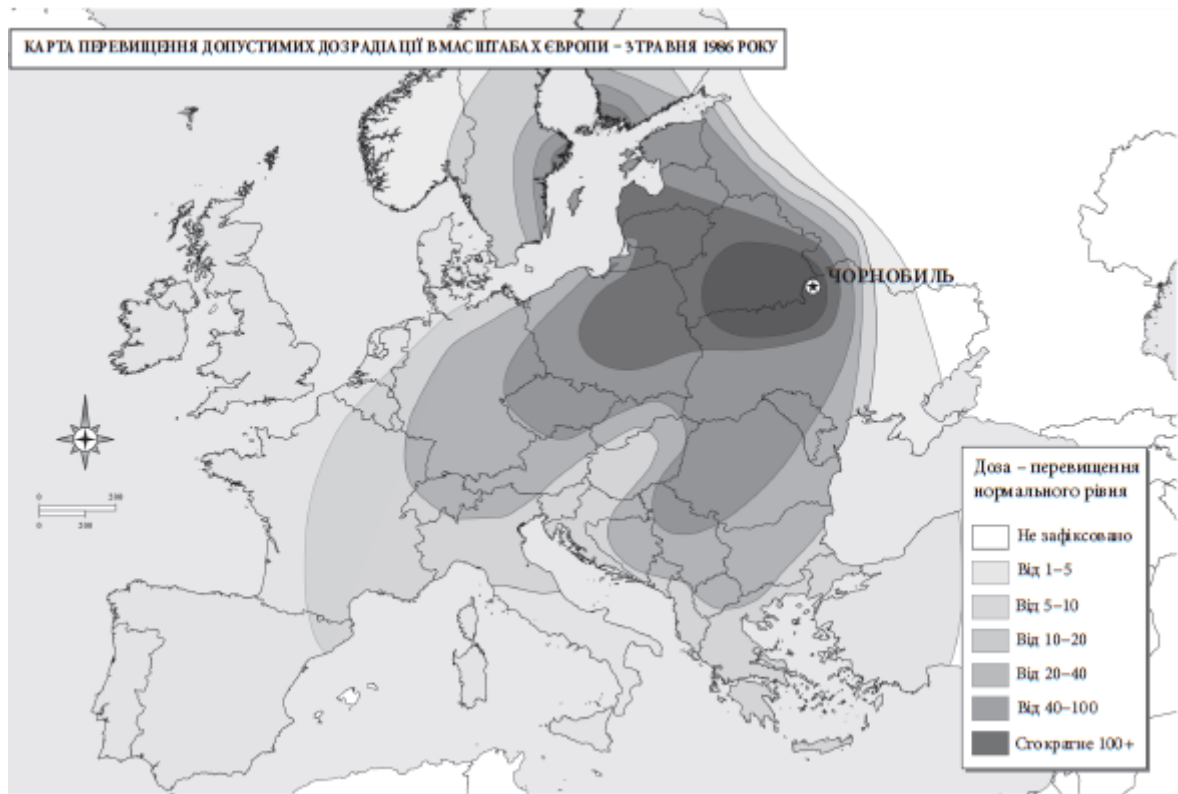


Схема 1. Карта розповсюдження радіації з відповідною дозою від Чорнобильської АЕС незабаром після самої катастрофи

Вибух та інтенсивний та довготривалий (з 26.04.86 по 06.05.86) вихід широкого спектру радіонуклідів зумовив забруднення величезних територій Європи (Швеції, Фінляндії, Німеччини, Австрії, Швейцарії та інших країн Європи), найбільшого радіоактивного забруднення зазнали території України, Білорусі та Росії.

Більшість викинутих радіонуклідів (ізотопи йоду – 131, 132, 133, 135, барію та лантану-140, нептунію-239 тощо), які називають короткоіснуючими, практично зникли у 1986 році протягом перших місяців після аварії внаслідок їх природного розпаду. Найбільшу небезпеку складають довгоіснуючі радіонукліди, такі як цезій-137, стронцій-90 і трансуранові елементи.

Україна багата родючими землями. Сільськогосподарські угіддя займають більшу частину її території – близько 407.1 тис.км², або 67.4% загальної площі країни. Забруднення цезієм-137 майже на 11000 км² цих угідь перевищує 1 Кі/км²

Практично всі ліси в Україні (займають площу 95 тис.км²), або майже 16% усієї території держави, зазнали радіоактивного забруднення. Це пов'язано з тим,

що під час інтенсивних переміщень забруднених повітряних мас над територією України ліси відіграли роль своєрідного «фільтру», на якому хмара залишила значну частину радіоактивності.

Первинне забруднення води сталося внаслідок випадань радіоактивних аерозолів на поверхню різних водних об'єктів України. З часом, внаслідок змиву радіоактивних речовин з поверхні водозаборів і в результаті масообміну між донними відкладами та водою відбувається вторинне її забруднення.

Починаючи з осені 1986 року, формування радіоактивного забруднення води річок і водойм відбувалось за рахунок процесів змиву радіоактивних речовин з поверхні водозаборів, заплав рік та інфільтраційного стоку забруднених підземних вод. Із 1993 р. рівні забруднення цезієм-137 поверхневих вод у системі Дніпровських водосховищ стабілізувались і з 1995 р. практично наблизилися до предаварійних показників.

Загалом майже 98% викинутого цезію-137 затримано екосистемою Дніпровських водосховищ [20].

Чорнобильська зона відчуження, яка є забороненою для сторонніх відвідувачів, що не мають спеціального дозволу, була створена 2 травня 1986 року, невдовзі після самої катастрофи. Спочатку вона існувала як територія радіусом 30 км (19 миль) від Чорнобильської атомної електростанції, призначена для евакуації та передана під військовий контроль [58].

Зона відчуження ЧАЕС включає територію площею приблизно 2700 квадратних кілометрів навколо станції в радіусі 19 миль (30 км). Ця територія вважалася найбільш сильно опроміненою і була закрита для всіх, окрім державних службовців та науковців. Близько 115 000 людей були евакуйовані в 1986 році, і ще 220 000 в наступні роки, залишивши пустельний ландшафт покинутих міст і сіл [55].

Зона відчуження Чорнобильської атомної електростанції залишилася з тих пір, хоча її форма змінилася, а розмір збільшився. У період між 1986 і 2000 роками загальна кількість осіб, які назавжди переселилися з найбільш

забруднених територій, зросла майже втричі - приблизно до 350 000. У перші дні створення зони відчуження виникла велика проблема з місцевими зловмисниками, які проникали на територію зони відчуження, щоб пограбувати Прип'ять та інші райони, але з 2007 року український уряд посилив міри для зупинення їх проникнення.

Чорнобильська зона відчуження - це не просто територія в 30 кілометрів навколо Чорнобильської атомної електростанції в Україні, це й зона з високим рівнем радіації, де люди не можуть жити і економіка цього регіону є постійно дотаційною. Зона була створена 2 травня 1986 року і спочатку охоплювала 30-кілометровий радіус від 4-го реактора.

Пізніше зона була розширена за рахунок евакуйованих районів Поліське і Народичі, і зараз охоплює площу приблизно 2 600 км². Зона перебуває під управлінням «Адміністрації зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення» у складі Міністерства надзвичайних ситуацій. Зона відчуження по суті безлюдна, але є 187 невеликих населених пунктів, які залишаються практично покинутими донині. Близько 130-150 мешканців залишаються в зоні відчуження, посилаючись на те, що їх зв'язки з домівками предків є надто важливими, щоб від них відмовитися [66].

Будівельні конструкції в зоні відчуження руйнуються і руйнуються, оскільки людям не дозволяється там жити. З 2011 року, коли керівники об'єкта визнали зону відчуження безпечною для відвідування, зросла кількість туристів, які приїжджають сюди, щоб відвідати цю територію. Хоча деякі частини зони залишаються небезпечно радіоактивними, можна відвідувати Чорнобильську територію, включаючи навіть зону відчуження, яка знаходиться в 30-кілометровому радіусі навколо станції [67].

Метою зони відчуження є обмеження доступу до небезпечних територій, зменшення поширення радіологічного забруднення та проведення радіологічного та екологічного моніторингу. Зона відчуження є однією з найбільш радіоактивно забруднених територій у світі і викликає значний

науковий інтерес через високий рівень радіаційного забруднення навколишнього середовища, а також зростаючий інтерес з боку туристів.

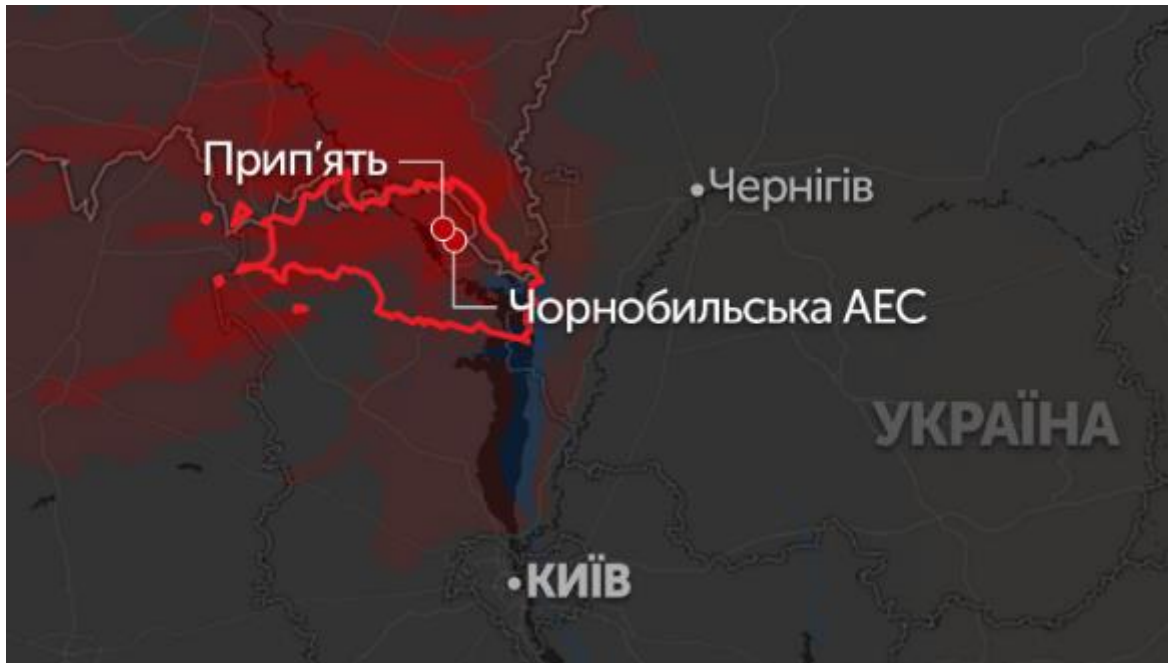


Схема 2.1. Наслідки радіоактивного забруднення територій

Територія, що охоплює 30 кілометрів навколо станції, вважається «зоною відчуження» і є фактично незаселеною (схема 2.1.). Сьогодні зона відчуження менш радіоактивна, ніж колись, але вона все ще залишається одним з найбільш радіоактивних місць у світі та в Україні [41].

РОЗДІЛ 3

СИСТЕМА РАДІАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ТА КОНЦЕПЦІЯ КОМПЛЕКСНОГО ВІДНОВЛЕННЯ І РОЗВИТКУ РАДІАЦІЙНО ЗАБРУДНЕНИХ ТЕРИТОРІЙ

3.1. Ліквідація наслідків радіаційних аварій

Радіаційні аварії лишають за собою від кількох десятків до кількох сотень тисяч зламаних долей людей, які отримали високу дозу опромінення та/або мали у примусовому порядку евакуюватись з того місця, яке вважали домом. РА наносять непоправимі наслідки не лише для людей, їх житла та інфраструктури, а й ще для екології. Радіація має доволі серйозний вплив на флору і фауну території, куди вона потрапляє після РА. Високі дози іонізуючого опромінення руйнують ліпіди, білки та нуклеїнові кислоти – основи передачі спадкової інформації, тобто вбиваючи живих істот на молекулярному рівні або призводячи до летальних мутацій. Саме тому, ліквідація наслідків РА є надзвичайно важливим аспектом для очищення територій та повернення їх у відповідний стан до моменту забруднення радіонуклідами.

Ліквідація наслідків радіаційних аварій одразу після катастрофи є складним і відповідальним завданням, але воно є першочерговим та невідкладним. Людство вже напрацювало кілька ключових заходів, які необхідно вжити для пом'якшення наслідків і мінімізації подальшої шкоди:

1. Забезпечення безпеки і благополуччя постраждалих людей є надзвичайно важливим. Це включає надання негайної медичної допомоги та підтримки тим, хто міг зазнати впливу радіації (наприклад, за методикою «ALARA»). Швидка та ефективна евакуація населення з груп ризику із зони ураження має вирішальне значення для запобігання подальшому опроміненню [11].

2. Необхідним є локалізація і контроль поширення радіоактивних матеріалів. Цього можна досягти шляхом створення зон відчуження та впровадження

заходів для запобігання подальшому витоку радіації. Наприклад, ізоляція уражених територій, впровадження належних протоколів поводження з відходами та убезпечення пошкоджених ядерних об'єктів [38].

3. Оперативний моніторинг та оцінка ступеня забруднення. Це передбачає проведення ретельної радіаційної розвідки і відбір проб для визначення уражених територій і рівня забруднення. Ця інформація має вирішальне значення для керівництва подальшими зусиллями з очищення та дезактивації.

4. Вжити заходи щодо стабілізації та захисту пошкоджених та опромінених конструкцій.

5. Комунікація та інформування населення.

6. Міжнародне співробітництво.

Тепер розглянемо ліквідацію РА на прикладі катастрофи на четвертому енергоблоку Чорнобильської АЕС.

МАГАТЕ надало експертну допомогу та провело навчання з планування та проектування зняття з експлуатації енергоблоків, що призвело до остаточного закриття та консервації Чорнобильської АЕС. Було вдосконалено систему та інфраструктуру поводження з радіоактивними відходами, включаючи створення системи зберігання РВ в об'єкті «Укриття», а також покращено управлінські структури та управління людськими ресурсами на станції. МАГАТЕ також підтримувало реабілітацію територій, що постраждали внаслідок цієї аварії та відновлення постраждалих районів із застосуванням екологічно безпечних технологій. На запити інших міжнародних організацій надавалася радіологічна підтримка у плануванні, розробці та реалізації проектів, пов'язаних з Чорнобилем. Чорнобильський форум, створений групою установ ООН у 2003 році, також поширював матеріали для наукового роз'яснення радіологічних, екологічних та медичних наслідків аварії [60].

Реакція U.S. NRC на Чорнобильську катастрофу включала визначення фактів аварії, оцінку наслідків аварії для регулювання американських атомних електростанцій та надання технічної допомоги Радянському Союзу. США допомогли побудувати захисне бетонне укриття, або саркофаг, щоб накрити зруйнований реактор для запобігання подальшим викидам радіації. Психологічні наслідки Чорнобиля залишаються широко розповсюдженими і глибокими, що призводить до самогубств, зловживання алкоголем і апатії [61]. Однак, дослідження стану здоров'я зареєстрованих працівників, які брали участь у ліквідації наслідків аварії (так званих «ліквідаторів»), не виявили прямого зв'язку між їхнім радіаційним опроміненням і збільшенням кількості форм раку або інших хвороб.

Аналізуючи різну літературу по ліквідації наслідків РА, ми можемо виділити наступні методи ліквідації радіаційних аварій:

1. *Дезактивація*: передбачає видалення зовнішніх радіоактивних частинок з організму. Це можна зробити, знявши одяг і взуття, що усуває близько 90% зовнішнього забруднення. Обережне миття водою з милом видаляє додаткові частинки радіації зі шкіри. Покриття ділянок залишкового радіаційного забруднення водонепроникними пов'язками/завісами може обмежити поширення забруднення на інші ділянки тіла [29].

2. *Рання діагностика*: вченими вже доволі давно описано методи ранньої діагностики променевих уражень. Якщо кількість лімфоцитів протягом першого тижня становить менше 0,1 г/л, слід розглянути можливість лікування факторами росту та трансплантації кісткового мозку [26].

3. *Регулярний моніторинг та огляди*: періодичний моніторинг, інспекції та аудити/обстеження об'єктів є практично ідеальними способами усунення радіаційних аварій і гарантування того, що все під контролем.

На жаль, ще не винайдено конкретної хімічної речовини, яка могла б усунути наслідки радіаційних аварій. Однак, вжиття зазначених нами заходів для захисту населення, себе, своїх близьких і домашніх тварин під час радіаційної аварії може допомогуть мінімізувати опромінення. Дезактивація та рання діагностика також є важливими методами ліквідації наслідків радіаційних аварій й запобіганню хвороби, що може індукувати радіація.

Для ліквідації РА, як правило, потрібно багато людей й техніки. Так, наприклад, Чорнобильська ядерна катастрофа 1986 р. призвела до викиду великої кількості радіації в навколишнє середовище, що потребувало величезного об'єму робіт. Загальна зареєстрована доза опромінення окремих працівників, які брали участь у ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС у період до 1990 року, становила від менш ніж 10 мілізівертів до більш ніж 1 зіверт, що було зумовлено, в основному, зовнішнім опроміненням. Середня доза, за оцінками, становила 120 мілізівертів, а 85% зареєстрованих доз були в діапазоні від 20 до 500 мілізівертів. Ліквідатори досі страждають від наслідків радіаційного опромінення, а деякі з них захворіли на рак щитоподібної залози та лейкомію [25].

Залучення обладнання та людей до ліквідації наслідків Чорнобильської радіаційної аварії мало вирішальне значення для обмеження як безпосередньої, так і довгострокової шкоди від катастрофи [69].

Екологічний стан води, ґрунтів та повітря на територіях, де сталися радіаційні аварії, вже багато років викликає занепокоєння. Вивчено вплив РА на біорізноманіття та екосистемні показники. Адаптація до радіації очевидна, і екосистеми динамічно змінюються з періодів відразу після аварій до теперішнього часу [27].

Радіонукліди були поглинуті рослинами, а згодом і тваринами. У деяких районах вони згодом були виявлені в молоці, м'ясі, лісових харчових продуктах, прісноводній рибі та деревині. Ліси та прісні водойми були серед найбільш постраждалих екосистем [35].

3.2. Радіаційний моніторинг зон, де відбулись радіаційні катастрофи

Зони радіаційних катастроф – це місця, які, як правило, через дуже високий радіаційний фон потребують постійного нагляду та контролю з боку державних та неурядових міжнародних організацій, таких як МАГАТЕ чи U.S. NRC.

В основі контролю стану радіаційного забруднення території лежить принцип *радіаційного моніторингу* - процесу вимірювання дози радіації або забруднення радіонуклідами з метою оцінки або контролю впливу радіації або радіоактивних речовин, а також інтерпретація результатів. Це захід безпеки, спрямований на захист здоров'я і безпеки населення та навколишнього середовища шляхом використання біологічного аналізу, альфа-сканування та інших методів [62].

Моніторинг навколишнього середовища - це вид радіаційного моніторингу, який передбачає систематичний збір та аналіз певних середовищ навколишнього середовища, таких як повітря, молоко та вода, для вимірювання потужності дози зовнішнього опромінення від джерел у навколишньому середовищі або концентрації радіонуклідів у навколишньому середовищі [37]. Практичне вимірювання радіації за допомогою каліброваних приладів радіаційного захисту має важливе значення для оцінки ефективності заходів захисту та оцінки дози опромінення, яку можуть отримати люди.

Вимірювальні прилади для радіаційного захисту бувають як "стаціонарними" (у фіксованому положенні), так і портативними (ручними або переносними). Система RadNet Агентства з охорони навколишнього середовища є прикладом загальнонаціональної системи радіаційного моніторингу навколишнього середовища, яка контролює повітря, опади та питну воду на предмет радіації [50].

Моніторинг територій, на яких сталися радіаційні аварії, є важливим кроком в управлінні наслідками таких інцидентів. Для моніторингу таких територій вживаються наступні заходи:

- Контроль доступу до ядерного або радіологічного об'єкту.

- Використовуйте відповідні методи радіаційного моніторингу, такі як плівкові бейджі, кільця TLD, дозиметри, вимірювачі експозиції та тести на витирання.

- Відбирати проби повітря в різних місцях, щоб визначити, чи є аномальні рівні радіації.

- Експлуатувати безперервну мережу радіаційного моніторингу на території, що оточує станцію, для забезпечення захисту здоров'я населення та навколишнього середовища.

- Ідентифікувати, перевіряти, вимірювати та контролювати популяції (людей і тварин) на постраждалій території [48].

Моніторинг територій, на яких сталися радіаційні аварії, є важливим аспектом радіаційної безпеки та захисту навколишнього середовища. Цей процес включає низку дій та стратегій, спрямованих на оцінку ступеня радіаційного забруднення, мінімізацію ризиків для здоров'я людей та пом'якшення впливу на навколишнє середовище. Ці заходи мають вирішальне значення для забезпечення безпеки населення і навколишнього середовища після радіаційної аварії впродовж десятків років. В свою чергу дослідження уражених територій дає можливість отримувати великий масив даних, на основі якого можливо прогнозувати подальший розвиток подій на основі розпаду різних радіонуклідів.

Варто нам пам'ятати, що моніторинг територій, де сталися РА - це безперервний процес, який вимагає співпраці між державними органами, науковими експертами та постраждалими громадами. Його мета - забезпечити мінімізацію радіаційних ризиків і захист довкілля, а також подолання безпосередніх і довгострокових наслідків таких аварій.

Радіаційний моніторинг у зоні Чорнобильської АЕС має вирішальне значення для забезпечення безпеки працівників та населення. Моніторингом рівня радіації в зоні займаються кілька організацій, зокрема Брістольський університет [44], агентство з охорони навколишнього середовища США,

Міжнародне агентство з атомної енергії та український ядерний оператор – НАЕК «Енергоатом».

Системи моніторингу включають системи радіологічного моніторингу, спеціалізоване обладнання для забезпечення безпеки та захисту, а також автоматизовані системи радіаційного моніторингу. Мережа моніторингу потужності дози гамма-випромінювання в Чорнобильській зоні відчуження (ЧЗВ) забезпечує систему раннього попередження про викиди радіоактивності в навколишнє середовище. Наразі рівень радіації в зоні перебуває в нормі [68].

Наведена таблиця (Додаток А) показує основні ізотопи, що призводять до високих доз радіації в організмі людини й мають свій певний період напіврозпаду й, відповідно, період їх «зберігання» у людському тілі. Де «А» – найвища група радіаційної небезпеки, а «Г» - відповідно, найменша.

Різні радіонукліди по різному впливають на людську життєдіяльність, але усі вони мають схожий механізм дії: будь-які живі істоти мають білки, амінокислоти та азотисті основи – «скелет» ДНК, на що й впливає радіація. Іонізуюче випромінювання завдає удар по найбільш слабким сполукам, що призводить до розриву зв'язків між різними молекулами в органічних сполуках – як наслідок відбувається молекулярна деградація біологічних речовин й подальший каскад реакцій, який призводить до смерті найбільш уразливих клітин, а потім і всього організму (якщо мова йде про складі, не одноклітинні організми).

Радіаційний моніторинг у зоні Чорнобильської атомної електростанції є критично важливим і безперервним процесом для оцінки та управління радіаційними ризиками на території, що постраждала внаслідок катастрофи 1986 року. Цей моніторинг включає різні стратегії та технології для забезпечення безпеки працівників, запобігання подальшому забрудненню та захисту навколишнього середовища. Нижче наведено те, що включає в себе радіаційний моніторинг в зоні ЧАЕС, а точніше методи й засоби, які ми можемо використовувати і використовуємо:

- 1) Перманентні станції моніторингу;
- 2) Відбір проб з навколишнього середовища ЧАЕС;
- 3) Дозиметрія та моніторинг персоналу;
- 4) Радіаційне картографування;
- 5) Радіологічні дослідження;
- 6) Моніторинг дикої природи;
- 7) Дистанційне зондування;
- 8) Аналіз даних та звітність;
- 9) Інформування та освіта населення;
- 10) Міжнародне співробітництво.

Радіаційний моніторинг у зоні відчуження Чорнобильської АЕС має важливе значення для забезпечення безпеки мешканців, працівників та відвідувачів цієї території (Додаток Б). Він також надає цінні дані для наукових досліджень довгострокових наслідків радіаційного впливу та відновлення екосистем після великої ядерної аварії. Постійний моніторинг зон, що зазнали радіаційного впливу, таких як Чорнобильська зона відчуження, має важливе значення для управління цими територіями з економічної, екологічної та соціальної точок зору [24].

Відтак, нагляд за зоною ЧАЕС й моніторинг рівня радіації проходить й сьогодні та планується проводити й надалі. Дозиметричні вимірювання, тобто збір даних про існуючий стан іонізуючого випромінення – це важлива, тривала та дуже кропітка робота, що проводиться різними державними та приватними організаціями з метою покращення стану довкілля. Зібрання інформації проходить майже постійно з метою побудови чіткої картини радіаційного забруднення, оскільки це дуже динамічна річ.

РОЗДІЛ 4

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Радіаційний моніторинг на об'єктах зберігання відпрацьованого ядерного палива СВЯП-1 здійснювався шляхом визначення питомої радіоактивності у басейнах витримки 1-5 (БВ 1-5), відсіку зберігання транспортних чохлаів (ВЗТЧ), лінії додаткового живлення (ЛДЖ) та каньйоні.

Відбір проб води здійснювався у відповідності до рекомендацій щодо проведення радіаційного моніторингу об'єктів довкілля.

Ідентифікацію γ -випромінюючих радіонуклідів та визначення питомої радіоактивності у зразках води водних басейнів СВЯП-1 проводили з використанням спектрометра енергій γ -випромінення СЕГ-002 «АКП-П» (далі спектрометр). Умови експлуатації спектрометру відповідають ГОСТУ 27451-87 «Засоби вимірювання іонізуючих випромінювань. Загальні технічні умови» для груп виконання В₁ «Температура та вологість», Р₁ -атмосферний тиск. Отже, температура навколишнього повітря повинна бути в інтервалі +10- +30⁰С, відносна вологість повітря до 75% при температурі до +30⁰С, атмосферний тиск 84,0-106,7 кПа (6630-800 мм рт.ст.). При роботі зі спектрометром зі враховувати «Основні санітарні правила протирадіаційного захисту України» (ОСПУ ДСП 6.074.120-01) та «Норми радіаційного захисту України» (НРБУ-97, НРБУ-97/Д-2000).

З метою зменшення впливу зовнішнього γ -фону та підвищення чутливості визначення активності *Блок детектування* розміщується всередині пасивного *Захисту*. Напівпровідниковий детектор виконан з особливо чистого Германію. *Захист* який являє собою конструкцію зі свинцевих кілець товщиною 100 мм з двома кришками, що обертаються та мають спеціальну ручку-фіксатор. Досліджуваний зразок води масою 100-500 г (в залежності від особливостей об'єкта зберігання ТРА) переносили у вибрану судину вибраної геометрії (тип геометрії «Маринеллі», «Дента»). Оскільки зразки для вимірювання СВЯП-1 є

рідкими, то використовували систему «Маринеллі». Далі судину зі зразком встановлюють всередину *Захисту* безпосередньо на *Блок детектування*. Під час вимірювання кришка *Захисту* повинна бути закритою та фіксується за допомогою ручки. У процесі вимірювань γ -кванти, що випромінюються досліджуваним зразком взаємодіють з напівпровідниковим детектором, на виході детектора підсилювача утворюються електричні імпульси, які потім формуються та підсилюються спектрометричним підсилювачем. Далі спектрометричний процесор перетворює амплітуду електричних імпульсів у цифровий код, який за допомогою програмного забезпечення переводиться у показники питомої γ -радіоактивності досліджуваних зразків [17].

Статистичну обробку даних здійснювали за допомогою програмного забезпечення спектрометру СЕГ-002 «АКП-П».

РОЗДІЛ 5

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На території ДСП «Чорнобильська АЕС» у даний час знаходяться 2 типу об'єктів зберігання ВЯП (відпрацьованого ядерного палива), це СВЯП-1 – сховище мокрого типу та СВЯП-2 – сховище сухого типу. СВЯП-2 є більш екологічно небезпечним та доцільним з економічної точки зору. Проте історично на території ЧАЕС починаючи з 1986 р. спочатку було побудовано сховище мокрого типу, т.т. СВЯП-1.

5.1. Особливості зберігання РАВ на СВЯП-1 ДСП «Чорнобильська АЕС»

СВЯП-1 розташовується на території проммайданчика ЧАЕС на північний захід від головного корпусу II-ої черги АЕС. Майданчик обмежений з північної та західної сторони існуючою охоронною зоною, з південного боку - залізницею між ХЖТО та СВЯП-1, і зі східного боку – майданчиком, призначеним для організації в'їзду/виїзду автотранспорту з території проммайданчика через КПП-2 (Додаток 2). Відстань з південного боку до ХЖТО становить близько 150 метрів, а до об'єкту "Укриття" близько 300 метрів. Схема розміщення СВЯП-1 представлена в Додатку В.

На Чорнобильській АЕС зберігання відпрацьованих тепловиділяючих збірок (ВТВЗ) здійснюється в сховищі мокрого типу (СВЯП-1) і в приреакторних басейнах витримки відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) на блоках №1-2. СВЯП-1 призначене для прийому і проміжного зберігання відпрацьованих тепловиділяючих збірок (ВТВЗ), що поступають з реакторних відділень енергоблоків після попередньої витримки.

За час експлуатації Чорнобильська АЕС накопичила на своєму майданчику близько 21 тисячі одиниць ядерного палива (відпрацьованих тепловиділяючих збірок). На теперішній час в п'яти відсіках басейну витримки СВЯП-1 який введено в експлуатацію в 1986р., знаходиться більш ніж 18 тисяч паливних

збірок. Існуюча проектна потужність СВЯП -1 не дозволяє розмістити на довготривалі зберігання всі ВТВЗ, що є на ЧАЕС [23].

Сховище відпрацьованого ядерного палива №1 «мокрого типу» призначене для прийому та зберігання ВТВЗ, після попередньої, не менш ніж 1,5-річної витримки їх у БВК або реакторах енергоблоків 1, 2, 3, а також для операцій вивантаження ВТВЗ із СВЯП- 1 з наступним переміщенням його в СВЯП-2 «сухого типу» [21].

Устаткування, що використовується в проекті СВЯП-1, входить у такі зони:

- зона підготовки ВТВЗ до зберігання;
- зона завантаження ВТВЗ;
- зона транспортування ВТВЗ;
- зона зберігання ВТВЗ;
- зона вивантаження ВТВЗ.

та системи:

- охолодження та очищення вод басейнів витримки СВЯП-1;
- оргпротечок та спецканалізації;
- технічного водопостачання СВЯП-1;
- Допоміжні системи.

У СВЯП-1 передбачено зберігання ВТВЗ наступних типів:

- ТВЗ робоча;
- ТВЗ робоча під гамма-камеру;
- ТВЗ термометрична;
- ТВЗ вимірювальна.

Дозволяється розміщення на постійне зберігання з кроком 230x110 мм у пеналах, заповнених водою:

- в одному відсіку БВ (з 1-го по 5-й) – до 4380 ВТВЗ;
- у каньйоні – до 420 ВТВЗ.

Дозволяється розміщення не більше 80 ВТВЗ в ОХТЧ на час, необхідний для виконання транспортно-технологічних операцій з ВЯП, на консолях у пеналах, заповнених водою з кроком не менше 230x110мм та у ЧТП.

Відсіки БВ, каньйон та ВЗТЧ заповнені водою до номінального рівня.

Утворення рідких радіоактивних відходів відбувається у таких системах СВЯП-1:

- системі охолодження та очищення вод басейнів витримки СВЯП-1 (з відпрацьованих регенераційних розчинів, пульп іонообмінних смол, пульп фільтроперліту);
- системі оргпротечок і спецканалізації СВЯП-1 (з водних приміщень санпропускників, дренажних і протікаючих вод, що утворюються при експлуатації СВЯП-1, організованих протікань).

Тверді радіоактивні відходи в СВЯП-1 утворюються в результаті експлуатації, технічного обслуговування, ремонту обладнання технологічних установок та допоміжних систем, а також при проведенні різних дезактиваційних робіт приміщень ЗСР, обладнання та ін.

Система поводження з радіоактивними відходами на СВЯП-1 є складовою системи поводження з радіоактивними відходами на ЧАЕС і забезпечує збирання, сортування, тимчасове зберігання, контроль, облік та відправлення РАВ, в тому числі зберігання у басейнах витримки ВЯП блоків №1, 2, 3

Радіологічний та фізико-хімічний контроль на СВЯП-1 здійснюється співробітниками хімблоку, який включає приміщення установки очищення та охолодження води відсіків БВ, каньйону та відсіку зберігання транспортних чохлаів, вузла приготування десорбуючих розчинів, трансформаторної, збору та перекачування стоків.

Наведемо короткий опис роботи обладнання хіміко-технологічної частини. Вода із нижньої частини відсіків басейну витримки, відсіку зберігання

транспортних чохлаів (забору води з каньйону немає) за загальним колектором подається на теплообмінники, де охолоджується технічною водою до температури $15\div 35^{\circ}\text{C}$. Повернення охолодженої води здійснюється за загальним колектором у верхню частину басейнів витримки, відсіку зберігання транспортних чохлаів та каньйону. У літній період зі збільшенням витрати технічної води через теплообмінники і підвищення температури води БВ більше 40°C включаються насоси СВЯП-1 НОЯТ-1(2) збільшення тепловідбіру.

Підключення системи очищення передбачено за результатами хімічного та гамма-спектрометричного аналізу. Частина охолодженої води після теплообмінника подається на один із перлітних фільтрів, де очищається від продуктів корозії, механічних домішок, олій. Після очищення на перлітному фільтрі вода може відразу повертатися до БВ.

При необхідності очищення води басейнів витримки від розчинених солей та зниження радіоактивного забруднення, вода після перлітного фільтра спрямовується на включені послідовно іонообмінні фільтри: катіонітовий та аніонітовий.

Для виключення попадання іонів з іонообмінних фільтрів у БВ вода проходить через фільтр-пастку, після чого скидається до басейнів витримки. Технологічна схема системи охолодження та очищення води басейнів витримки дозволяє виконувати забір води з БВ та повернення в БВ як з усіх відсіків одночасно, так і окремо (рис 5.2.1):

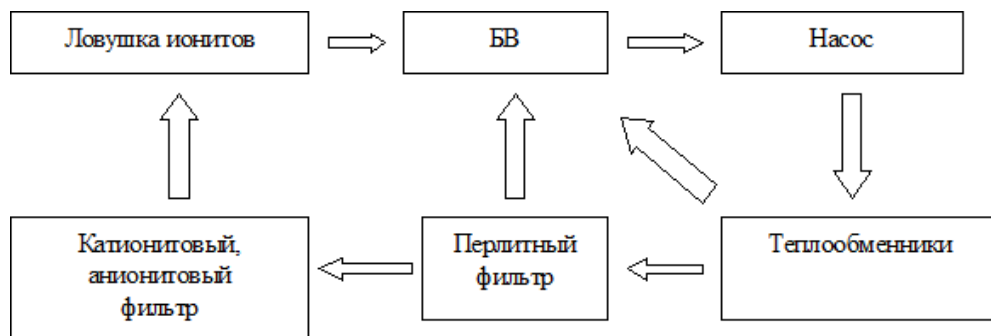


Рис. 5.2.1. Схема охолодження та очищення басейну витримки (БВ)

Контроль якості води басейнів витримки (БВ) СВЯП-1 здійснюється персоналом ДСП ЧАЕС згідно вимог ПНАЕ Г-14-029-91 [10] та складається з контролю водно-хімічного режиму (ВХР) та радіохімічного контролю.

Згідно вимог до експлуатаційних характеристик фізико-хімічні показники басейнів витримки СВЯП-1 повинні відповідати наступним вимогам (табл.5.1.1)

Таблиця 5.1.1.

Фізико-хімічні показники якості басейнів витримки СВЯП-1

№ з/п	Назва показника	Значення показника (норматив)	Значення показника 20.09.2023 р.
1.	рН (водневий показник)	5,5-8,0	7,4
2.	Питома електропровідність, мкСм/см	< 3,0	2,2
3.	Вміст хлорид-йонів, мкг/дм ³	< 100,0	53,0

5.2. Аналіз радіаційної безпеки об'єктів зберігання СВЯП-1 ДСП «Чорнобильська АЕС»

Для оцінювання умов зберіганні та радіаційної безпеки персоналу для довкілля нами були досліджені зразки води у об'єктах зберігання на СВЯП-1у період липень-жовтень 2023 р. (табл. 5.2.1-5.2.3.). При цьому слід звернути, що на даний момент у басейнах витримки зберігається різна кількість ТВЗ, зокрема:

- ✓ БВ-1 – 4296
- ✓ БВ-2 – 4319
- ✓ БВ-3 – 4327
- ✓ БВ-4 – 4240

✓ БВ-5 – 1383

Структурна схема та розміщення БВ, каньону та ВЗТЧ представлено на схемі 5.2.1

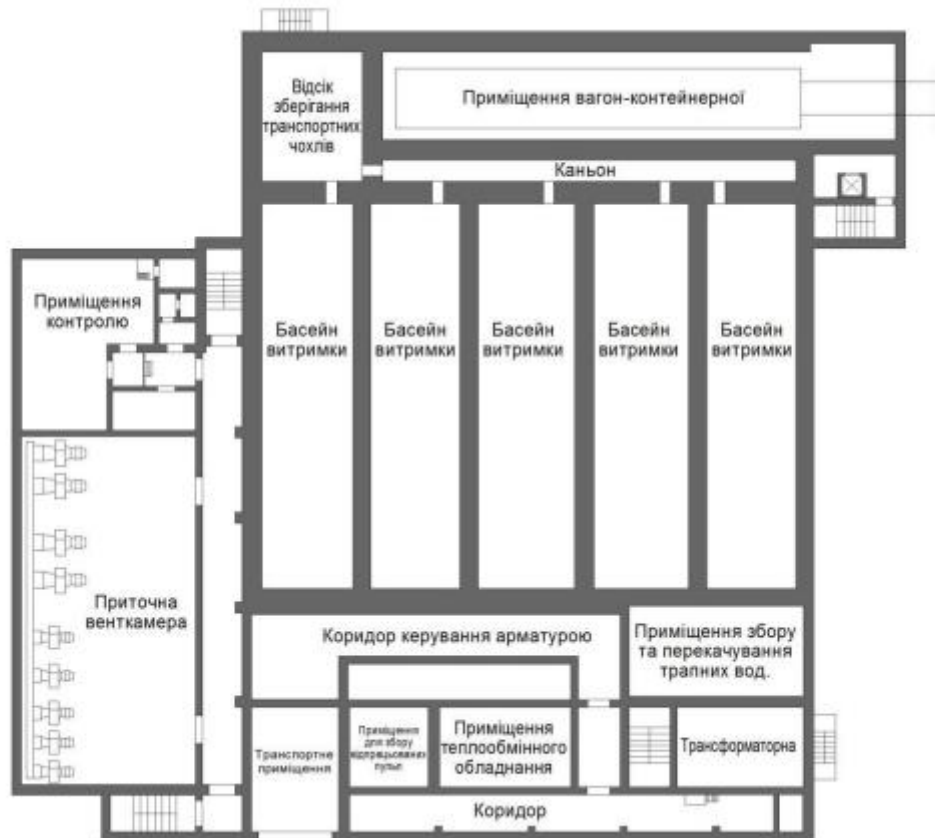


Схема 5.2.1. Схема відсіку «мокрого» сховища ВЯП

Зберігання ВЯП у СВЯП-1 здійснюється в БВ, який складається з п'яти відсіків. Конструктивно, відсіки БВ являють собою залізобетонну ємність, стіни і днище якої облицьовані корозійностійкою сталлю. Облицьовання днища наварене на заставні. Облицьовання стін вільно навішене з приварюванням до раніше встановлених залізобетонних плит. Стіни і днище відсіків БВ є біологічним захистом для персоналу СВЯП-1. Відсіки БВ мають щільне перекриття, що являє собою кронштейни консольного типу без підкосів для розвішування ВЯП в пеналах.

Відділення зберігання ВЯП складається з басейну з водою й транспортної зали. Басейн має чотири відсіки для зберігання чохлах з ВТВЗ, та передаточний

коридор, який з'єднує всі відсіки басейну між собою, а також з відсіками перевантаження та промивки збірок. Відсіки басейну з'єднані з передаточним коридором гідрозатворами для забезпечення можливості розділення відсіків за технологічними умовами та проведення ремонту [21]

Дані радіологічного контролю технологічних середовищ СВЯП-1 представлені у табл. 5.2.1-5.2.3.

Так, показники питомої активності по Cs^{137} на 01.07.-05.10.2023 р. становили:

Таблиця 5.2.1.

Показники радіологічного контролю технологічних середовищ СВЯП-1

№ з/п	Точка контролю	Питома активність за Cs^{137} , Бк\кг, $X \cdot 10^3$				Критичні показники за Cs^{137} , Бк\кг, $X \cdot 10^3$
		Дата відбору проб				
		03.07.2023	03.08.2023	28.09.2023	05.10.2023	
1.	Басейн витримки (БВ)-1	9,42	6,59	5,02	5,09	37,00
2.	Басейн витримки (БВ)-2	9,64	6,72	4,43	5,07	37,00
3.	Басейн витримки (БВ)-3	9,42	6,37	5,16	5,82	37,00
4.	Басейн витримки (БВ)-4	7,88	6,22	4,98	5,47	37,00
5.	Басейн витримки (БВ)-5	8,92	6,23	5,28	5,57	37,00
6.	Відсік зберігання топливних чохлів (ВЗТЧ)	9,2	6,77	5,35	6,25	37,00
7.	Каньйон	9,68	6,62	5,27	5,64	37,00

Як видно з табл. 5.2.1 показники питомої активності досліджуваної води об'єктів зберігання та технологічних середовищ мають динаміку щодо сезонності. Наприклад, серед усіх показників максимальне значення відмічається у липні та серпні у БВ-2, проте у вересні та жовтні у цьому відсіку зберігання показники мінімальні. Слід відмітити показники каньйону, які, крім жовтня, характеризуються майже максимальними показниками.

Взагалі показники питомої радіоактивності відносно ізоотопу Cs^{137} усіх технологічних середовищ значно менше граничних меж – $37 \cdot 10^3$ Бк/кг, але згідно експлуатаційних вимог при досягненні показника питомої активності значення $5,7 \cdot 10^5$ Бк/кг включаються установки водоочищення.

Для порівняння, згідно ДСанПіНу 2.2.4-171-10 вода питна може мати питому радіоактивність по ізоотопу Cs^{137} до $2,0$ Бк/дм³ [6].

5.3. Особливості зберігання РАВ на СВЯП-2 ДСП «Чорнобильська АЕС»

На сьогодні на СВЯП-2 (Сховищі відпрацьованого ядерного палива; рос. ХОЯТ-2) співробітниками підприємства використовуються наступні заходи щодо мінімізації утворення РАВ після аварії на ЧАЕС. А саме:

- скорочення надходження в зону суворого режиму (ЗСР) устаткування і матеріалів в пакувальній тарі, виключення проносу в ЗСР предметів, що не мають відношення до виконуваних робіт;
- застосування вже давно застосовуваних технологій і новітніх доступних розробок, що призводять до мінімального утворення РАВ (у т.ч. вторинних) і забруднення застосовуваних засобів виробництва;
- використання конструктивних матеріалів, що легко дезактивуються і з тривалими термінами служби;

- первинне сортування і роздільне поводження з різними видами відходів, що запобігають збільшенню обсягів відходів більш високого рівня радіоактивності внаслідок змішування їх з менш радіоактивними;

- організація дезактивації використуваних інструментів, обладнання, додаткових засобів індивідуального захисту з метою їх повторного використання.

Для мінімізації РАВ під час поводження з радіоактивними матеріалами на СВЯП-2 прийнято такі проектні рішення:

- усі поверхні гарячої камери, над якими відбувається переміщення радіоактивних матеріалів або транспортного чохла – облицьовані відповідним шаром нержавіючою сталлю;

- система подвійної кришки для 200-літрових бочок, призначена для запобігання розповсюдженню радіоактивного забруднення під час транспортно-технологічних операцій між різними приміщеннями;

- при різанні відпрацьованої тепловідляючої зборки (зокрема й пошкоджених) стружку збирають всмоктувальним пристроєм на ділянці різання;

- фільтруючі елементи всмоктувального пристрою вакуумного пилососа мають розміри, які дозволяють поміщати їх у паливні патрони;

- якщо під час зберігання виникне необхідність перепакування двостінний сухий екранований пенал з РАВ, то пучки тепловідляючих елементів залишаться всередині паливного патрону;

- збільшена періодичність заміни фільтрів вентиляції за рахунок застосування захисного кожуха подвійної кришки паливного патрону, що разом зі всмоктувальним пристроєм вакуумного пилососа, дасть змогу істотно знизити обсяги об'ємних твердих радіоактивних відходів 3-ї групи.

Усі можливі викиди відпрацьованого ядерного палива та аерозольних фракцій з трансурановими елементами, утворення яких можливе, осідають на фільтрах пилососів і всмоктувального пристрою установки різання, які в міру

використання завантажуються в паливний патрон і потім - у двостінний сухий екранований пенал.

Радіоактивні елементи, що знаходяться у РАВ, мають різні фізико-хімічні властивості та технологічні особливості «боротьби» з ними й неоднаково впливають на людей та природу, завдаючи при цьому суттєвої шкоди. Саме тому забруднюючі РАВ вимагають зменшення обсягу до мінімально можливого та якомога надійної ізоляції й переробки.

ВИСНОВКИ

1. Вважаємо, що основними причинами аварії на ЧАЕС є недоліки у конструкції реактору РВПК-1000, зокрема стрижнів-поглиначів, які в умовах невдалого експерименту по зупиненню 4-го енергоблоку щодо вивчення можливості використання інерції турбогенератора станції в разі втрати електроживлення призвели до позитивної реактивності, зростанню парозмісту, падінню витрат теплоносія. Отже відбулось різке зростання потужності реактору, що в умовах запаровування активної зони та відповідне зневоднення активної зони призвело до вибухів та руйнуванню реактора.
2. Підключення системи очищення водних басейнів СВЯП-1 передбачено за результатами хімічного та гамма-спектрометричного аналізу. При цьому частина охолодженої води після теплообмінника подається на один із перлітних фільтрів, де очищається від продуктів корозії, механічних домішок, олій та одразу повертається до басейну витримку. За необхідності очищення води басейнів витримки від розчинених солей та зниження радіоактивного забруднення, вода після перлітного фільтра спрямовується на включені послідовно іонообмінні фільтри, катіонітовий та аніонітовий.
3. За даними радіометричного аналізу з використанням спектрометру СЕГ-002 «АКП-П» показано, що вода об'єктів зберігання відпрацьованого ядерного палива СВЯП-1 знаходиться у допустимих нормативними вимогами межах та не перевищує критичних показників питомої активності.
4. Для мінімізації впливу радіоактивного випромінення під час поводження з компонентами відпрацьованого ядерного палива матеріалами на СВЯП-2 пропонується обліцовка поверхні гарячої камери шаром нержавіючої сталі, використання системи подвійної кришки для 200-літрових бочок, використання вакуумного пилосмоку при різанні відпрацьованої тепловиділяючої зборки, перенесення фільтруючих елементів пилосмоку у

паливні патрони (при необхідності перепакуння сухого пеналу з РАВ пучки ТВЗ залишаються всередині паливного патрону), а також збільшена періодичність заміни фільтрів вентиляції за рахунок застосування захисного кожуха подвійної кришки паливного патрону. Останнє, разом зі всмоктувальним пристроєм вакуумного пилососа, дає можливість знизити об'єм твердих радіоактивних відходів 3-ї групи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрушків Б. М. Чорна скрижаль України / Б. М. Андрушків; Ред. Б. Грабовський. Тернопіль: Джура, 2001. 276 с.
2. Барановська Н. П. Україна – Чорнобиль – Світ: Чорнобильська проблема у міжнародному вимірі, 1986–1999. – К.: Ніка-Центр, 1999. 400 с
3. Барановська Н. Чорнобильська зона відчуження – явище сучасності. Історико-географічні дослідження в Україні: Збірник наукових праць / НАН України. Інститут історії України. – 2004. – Вип. 7. С. 2-25.
4. Довідник сімейного лікаря з питань психосоматики /Н.О.Марута, В.І.Коростій, Г.М.Кожина, Л.М.Гуменюк; За ред..І.С.Вітенка. – К.:Здоров'я, 2012. 384 с.
5. Долін В. В. Самоочищення природного середовища після Чорнобильської катастрофи = Environmental selfclearing after the Chornobyl catastrophe : монографія / В. В. Долін, Г.М. Бондаренко, О.О. Орлов ; НАН України, Ін-т геохімії навколишнього середовища. Київ: Наук. думка, 2004. 224 с.
6. ДСанПіН 2.2.4-171-10: «Гігієнічні вимоги до питної води, призначеної для споживання людиною» URL: <https://waterlux.ua/articles/trebovaniya-k-kachestvu-pitevoy-vody-gsanpin-2-2-4-171-10/> (Дата звернення 19.12.2023).
7. Закон України «Про впорядкування питань, пов'язаних із забезпеченням ядерної безпеки» від 24.06.2004 р. /ВР України URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1868-15> (дата звернення 08.11.2023).
8. Інформаційні матеріали до річниці аварії на Чорнобильській АЕС: Український інститут національної пам'яті: Інформаційні матеріали до річниці аварії на Чорнобильській АЕС. URL: <https://uinp.gov.ua/informaciyni-materialy/zhurnalistam/informaciyni-materialy-do-richnyci-avariyi-na-chornobylskiy-aes>. (Дата звернення 11.12.2023).
9. Ковальова В. М. Превентивні заходи щодо радіаційної безпеки на заес в умовах воєнного часу / В. М. Ковальова // Інновації медичної освіти: перспективи, виклики та можливості : матеріали II Всеукр. дистанційної

- наук.-практ. конференції, м. Запоріжжя, 23 січня 2023 р. / під ред. Т. Ю. Четвертак. - Запоріжжя, 2023. – С. 313-319.
10. ПНАЕ Г-14-029-91 Правила безпеки при зберіганні та транспортуванні ядерного палива на об'єктах атомної енергетики.
 11. Протоколи з надання екстреної медичної допомоги постраждалим від радіаційних, біологічних та хімічних чинників (Nuclear, Biological, Chemical – NBC): навч. посіб. Г.Г. Рошін, М.І. Тутченко, М.І. Гуменюк та ін. Київ, 2021. 22 с.
 12. Радатлас: Радіаційно-гігієнічні регламенти третьої групи- втручання в умовах радіаційної аварії. Види, масштаби і фази радіаційних аварій. URL: https://radatlas.isgeo.com.ua/norms_laws/norms/norm4/nrsu_97/chapter7.htm. (ДАТА ЗВЕРНЕННЯ 16.11.2023).
 13. Радіо-біофізичні та медико-гігієнічні наслідки Чорнобильської катастрофи: шляхи пізнання та подолання : практич. посіб. сімейн. лікаря / Нац. акад. мед. наук України, Держ. установа "Нац. наук. центр радіац. медицини НАМН України" ; за ред.: В. Г. Бебешко, Б. С. Прістер, М. І. Омелянець. – Ужгород : Патент, 2017. – 504 с.
 14. Семенуха В. Ядерна безпека в умовах перспективного розвитку атомної енергетики України, Unspecified thesis. Одеса, 2020, С. 71-73 с.
 15. Словник – довідник з екології : навч.-метод. посібник / уклад. О. Г. Лановенко, О. О. Остапішина. Херсон : ПП Вишемирський В.С., 2013. 226 с.
 16. Соціально-економічний аналіз надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру / Волошин С.М., Жарова Л.В., Хлобистов Є.В., Чебанов О.А. / За науковою редакцією д.е.н., проф. Хлобистова Є.В. / РВПС України НАН України, НДІ СРП – Сімферополь, 2010. – с. 3-5.
 17. ТОВ «НВП» АТОКОМПЛЕКС ПРИЛАД: СЕГ-002 «АКП-П» Спектрометр енергій гамма-випромінювання напівпровідниковий. URL: <http://www.akp.com.ua/index.php?o> (Дата звернення 23.12.2023).

18. Холкін Д. Г., Смольський О. С. Радіаційні аварії на АЕС та їх фізико-хімічні особливості. 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. 82-84.
19. Чалий Д. О. та ін. Техногенна безпека АЕС: навч. посібн. / Д. О. Чалий, А. Б. Тарнавський, Р. Ю. Сукач, Р. Б. Веселівський; Держ. служба України з НС. Львів. ДУБЖД: Львів:Каменяр, 2020. С.139-260.
20. Черкаський обласний ЦКПХ: Чорнобиль – 30 років потому. URL: <https://www.oblses.ck.ua/index.php?option> Дата звернення (19.12.2023).
21. Чернобыльская АЭС, III очередь. Хранилище отработавшего ядерного топлива (ХОЯТ), I очередь. Рабочий проект. Сборно-монолитный вариант. Общая пояснительная записка. Раздел «а». 1983. 672 с.
22. Чорнобильська аварія: доповнення до INSAG-1: Звіт Міжнародної консультативної групи з ядерної безпеки Міжнародного агентства з атомної енергії, Серія видання по безпеці № 75-INSAG-7 (ISBN: 9201046928), 1992. URL: <https://www.iaea.org/ru/publications/4233/chernobylskaya-avariya-dopolnenie-k-insag-1>. (Дата звернення 14.09.2023).
23. Чорнобильська АЕС: Забезпечення безпеки. URL: <https://chnpp.gov.ua/ua/uk/googl/37xVtS> (Дата звернення 02.01.2023).
24. Як природа Чорнобиля захищає нас від радіації ? URL: https://ecoaction.org.ua/pryroda-chornobyliya-zakhyshchaie.html?gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMI2bqSg_m5gwMVPDwGAB2pZQfVEAAAYASAAEgI07vD_BwE (Дата звернення 04.11.2023).
25. Aliyev J. Chernobyl disaster liquidators recall horrors of nuclear accident, 2021 URL: <https://www.aa.com.tr/en/europe/chernobyl-disaster-liquidators-recall-horrors-of-nuclear-accident/2221276> (Дата звернення 12.09.2023).

26. Bomanji J., Novruzov F., Vinjamuri S. Radiation accidents and their management: emphasis on the role of nuclear medicine professionals. *Nucl. Med. Commun.*. 2014 Oct;35(10). P. 995-1002.
27. Cannon G., Kiang J. A review of the impact on the ecosystem after ionizing irradiation wildlife population. *Int J Radiat Biol.* 2022;98(6). P.1054-1062.
28. Cezero L. Radiation accidents and incidents. What do we know about the medical management of acute radiation syndrome ? Reports of Practical Oncology and Radiotherapy. 2011. Vol. 16, No 4. P. 119-122.
29. Cibulsky S., Sokolowski D., Lafontaine M., Gangon C. etc. Mass Casualty Decontamination in a Chemical or Radiological/Nuclear Incident with External Contamination: Guiding Principles and Research Needs, 2015 URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26635995/> (Дата звернення 19.11.2023).
30. DiCarlo A., Maher C., Hick J., Hanfling D. etc. Radiation Injury After a Nuclear Detonation: Medical Consequences and the Need for Scarce Resources Allocation. Disaster Med Public Health Prep. 2011 Mar; 5(0 1): S32–S44.
31. Environmental topics: Radioactive Decay. United States Environmental Protection Agency RADIOACTIVE DECAY, 2023. URL: <https://www.epa.gov/radiation/radioactive-decay>. (Дата звернення 15.12.2023).
32. Foreman M., Slawin A. An introduction to serious nuclear accident chemistry. Cogent Chemistry, 2015, 1(1):1049111. URL: https://www.researchgate.net/publication/281391489_An_introduction_to_serious_nuclear_accident_chemistry, (Дата звернення 12.11.2023).
33. Friedstat J., Brown D., Levi B. Chemical, Electrical, and Radiation Injuries. *Clin Plast Surg.* 2017 Jul;44(3):657-669.
34. Gonzales J. Strengthening the safety of radiation sources & the security of radioactive materials: timely action. Sfety of radiation sources and security of radioactive materials: proceedings of a conference, Dijon, France, 14-18 september 1998. P. 5-9.

35. Hashimoto S., Komatsu M., Miura S. Forest Ecosystems and Radioactive Contamination, 2022 URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-9404-2_4 (Дата звернення 22.08.2023).
36. Hogberg L. Root Causes and Impacts of Severe Accidents at Large Nuclear Power Plants. *Ambio*. 2013 Apr; 42(3). P. 267–284.
37. IAEA Safety Glossary Terminology used in nuclear safety and radiation protection, 2007. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1830_web.pdf (Дата звернення 12.11.2023).
38. ICRP: Protecting people, animals, and environment around the world from the harmful effects of radiation, URL: <https://www.epa.gov/radiation/protecting-yourself-radiation> (Дата звернення 08.12.2023).
39. Jeanette A. L., Lawrence S. L. Radiation Accident - Isolated Exposure. *Ciottono's Disaster Medicine*, (Second Edition), 2016. P. 625-629.
40. Join the thousands of scientists using the CSD data and CCDC software to discover new drugs, improve material stability, and advance structural science. URL: [https://chem.libretexts.org/Courses/University_of_Kentucky/UK%3A_CHE_103_-_Chemistry_for_Allied_Health_\(Soult\)/Chapters/Chapter_10%3A_Nuclear_and_Chemical_Reactions/10.1%3A_Nuclear_Radiation](https://chem.libretexts.org/Courses/University_of_Kentucky/UK%3A_CHE_103_-_Chemistry_for_Allied_Health_(Soult)/Chapters/Chapter_10%3A_Nuclear_and_Chemical_Reactions/10.1%3A_Nuclear_Radiation). (Дата звернення 15.12.2023).
41. Kingsley J. Life goes on at Chernobyl 35 years after the world's worst nuclear accident, 2021. URL: <https://www.nationalgeographic.com/culture/article/life-goes-on-chernobyl-35-years-after-worlds-worst-nuclear-accident> (Дата звернення 11.10.2023).
42. Luhar I., Luhar S., Abdullah M., Sandu A. Solidification /Stabilization Technology for Radioactive Wastes Using Cement: An Appraisal, *Materials (Basel)*. 2023 Feb; 16(3)ю P. 954.

43. Mandal A. Radiation Poisoning History. Reviewed by Sally Robertson, 2023. URL: <https://www.news-medical.net/health/Radiation-Poisoning-History.aspx> (дата звернення 15.12.2023).
44. Martin P. University of Bristol researchers to help enhance radiation monitoring systems in Chernobyl, University of Bristol, 2023 URL: <https://www.bristol.ac.uk/cabot/news/2023/radiation-monitoring.html> (Дата звернення 02.10.2023).
45. Mental health consequences of chemical and radiologic emergencies: a systematic review. McCormick LC, Tajeu GS, Klapow J. Emerg Med Clin North Am. 2015 Feb;33(1):197-211.
46. Mokhov V., Trunov N. VVER reactors: clean and reliable source of energy in the past and in the future. International Conference on Opportunities and Challenges for Water Cooled Reactors in 21-st Century, 2009 URL: <https://inis.iaea.org/search/search.aspx?ori> (Дата звернення 14.12.2023).
47. Nuclear explained. Nuclear power and the environment. Nuclear reactors and power plants have complex safety and security features, 2019. URL: <https://instituteforglobalaffairs.org/2023/05/bytes-nuclear-weapons-you/?gclid>. (Дата звернення 22.09.2023).
48. Population Monitoring in Radiation Emergencies: A Guide for State and Local Public Health Planners, 2014 URL: <https://www.cdc.gov/nceh/radiation/emergencies/pdf/population-monitoring-guide.pdf> (Дата звернення 09.09.2023).
49. Radioactive Accidents: The Forgotten Stories/ Columbia K=1 Project, Center for Nuclear Studies. August 01, 2012 URL: <https://k1project.columbia.edu/a11>. (Дата звернення 18.09.2023).
50. RadNet: Nationwide Environmental Radiation Monitoring. URL: <https://www.epa.gov/radnet> (Дата звернення 22.09.2023).
51. Reactor types: RBMK URL: <https://insp.pnnl.gov/-profiles-reactors-vver1000.htm>. (Дата звернення 02.01.2024).

52. Reisz J., Bansal N., Qian J. etc. Effects of ionizing radiation on biological molecules--mechanisms of damage and emerging methods of detection. Antioxid Redox Signal. 2014 Jul 10; 21(2). P. 260–292.
53. Rojavin Y., Seamon M., Tripathi R., Papadimos T. etc. Civilian nuclear incidents: An overview of historical, medical, and scientific aspects. J Emerg Trauma Shock. 2011 Apr-Jun; 4(2): 260–272.
54. Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Health effects due to radiation from the Chernobyl accident. New York: United Nations, 2011. URL: https://www.unscear.org/docs/reports/2008/11-80076_Report_2008_Annex_D.pdf (Дата звернення 14.10.2023).
55. Spencer L. 12 Facts About the Chernobyl Exclusion Zone, 2016. URL: <https://www.mentalfloss.com/article/78779/12-facts-about-chernobyls-exclusion-zone-30-years-after-disaster>. (Дата звернення 22.09.2023).
56. The History of Radiation: Marie Curie, Henri Becquerel, Wilhelm Röntgen April. URL: <https://www.mirion.com/discover/knowledge-hub/articles/education/the-history-of-radiation>. (Дата звернення 13.10.2023).
57. Toxicological Profile for Cobalt Draft for Public: Comment August 2021 Toxicological Profile for Cobalt Draft for Public Comment July 2022 Clifton Road, N.E. URL: <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp149-c4.pdf>. (Дата звернення 15.10.2023).
58. Turner B. What is the Chernobyl Exclusion Zone? Journal of Environmental Radioactivity, V. 265, September 2023, 107220. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X23001133?via=i>. (Дата звернення 21.10.2023).
59. United States Nuclear Regulatory Commission (U.S. NRC): Frequently Asked Questions About Radiation Protection, 2020. URL: <https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/related-info/faq.html>. (Дата звернення 17.11.2023).

60. U.S. Government Accountability Office. How Chernobyl Jump-Started the Global Nuclear Safety Regime. Posted on September 12, 2019. URL: <https://www.gao.gov/blog/2019/09/12/how-chernobyl-jump-started-the-global-nuclear-safety-regime> (Дата звернення 14.11.2023).
61. US.NRC: Backgrounder on Chernobyl Nuclear Power Plant Accident. URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/chernobyl-bg.html> (Дата звернення 15.10.2023).
62. U.S. NRC: Monitoring of radiation, 2021 URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/monitoring-of-radiation.html> (Дата звернення 22.12.2023)
63. US.NRC: Technical Training Center. Biological Effects of Radiation, 2009. URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/for-educators/09.pdf>. (Дата звернення 15.11.2023).
64. Wehrden H., Fischer J., Brandt P., Wagner V. etc. Consequences of nuclear accidents for biodiversity and ecosystem services. April 2012 Conservation Letters 5:81-89.
65. Weintraub S., Salter B., Chevalier C., Ransdell S. Human factor associations with safety events in radiation therapy. J Appl Clin Med Phys. 2021 Oct;22(10):288-294.
66. Whipple M. A Generation Later, What Does Chernobyl Look Like Today? 2023. URL: <https://www.thecollector.com/chernobyl-today/> (Дата звернеєя 25.09.2023).
67. White R. What Does Chernobyl Look Like Today and Can You Go There? 2023 URL: <https://www.newsweek.com/what-does-chernobyl-look-like-today-can-you-go-there-1774395> (Дата звернення 15.08.2023).
68. Wood M., Beresford N., Barnett C. Etc. Chernobyl radiation spikes are not due to military vehicles disturbing soil, 2023 URL: <https://arxiv.org/abs/2204.03157> (Дата звернення 03.11.2023).

69. World Nuclear Association: Chernobyl Accident 1986, 2022. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/chernobyl-accident.aspx> (Дата звернення 09.10.2023).
70. Wu Y., Chen Z, Wang Z. etc. Nuclear safety in the unexpected second nuclear era, Edited by M. Granger Morgan, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, and approved July 10, 2019 (received for review November 25, 2018), August 19, 2019, 116 (36). P. 17673-17682.
71. World Health Organization: Radiation and health. URL: <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-and-health?> (Дата звернення 23.12.2023).
72. Yablokov A., Nesterenko V. Chernobyl: Consequences of the Catastrophe for People and the Environment. Environ Health Perspect. 2010 Nov; 118(11): A500.

Додаток А

Таблиця 1.

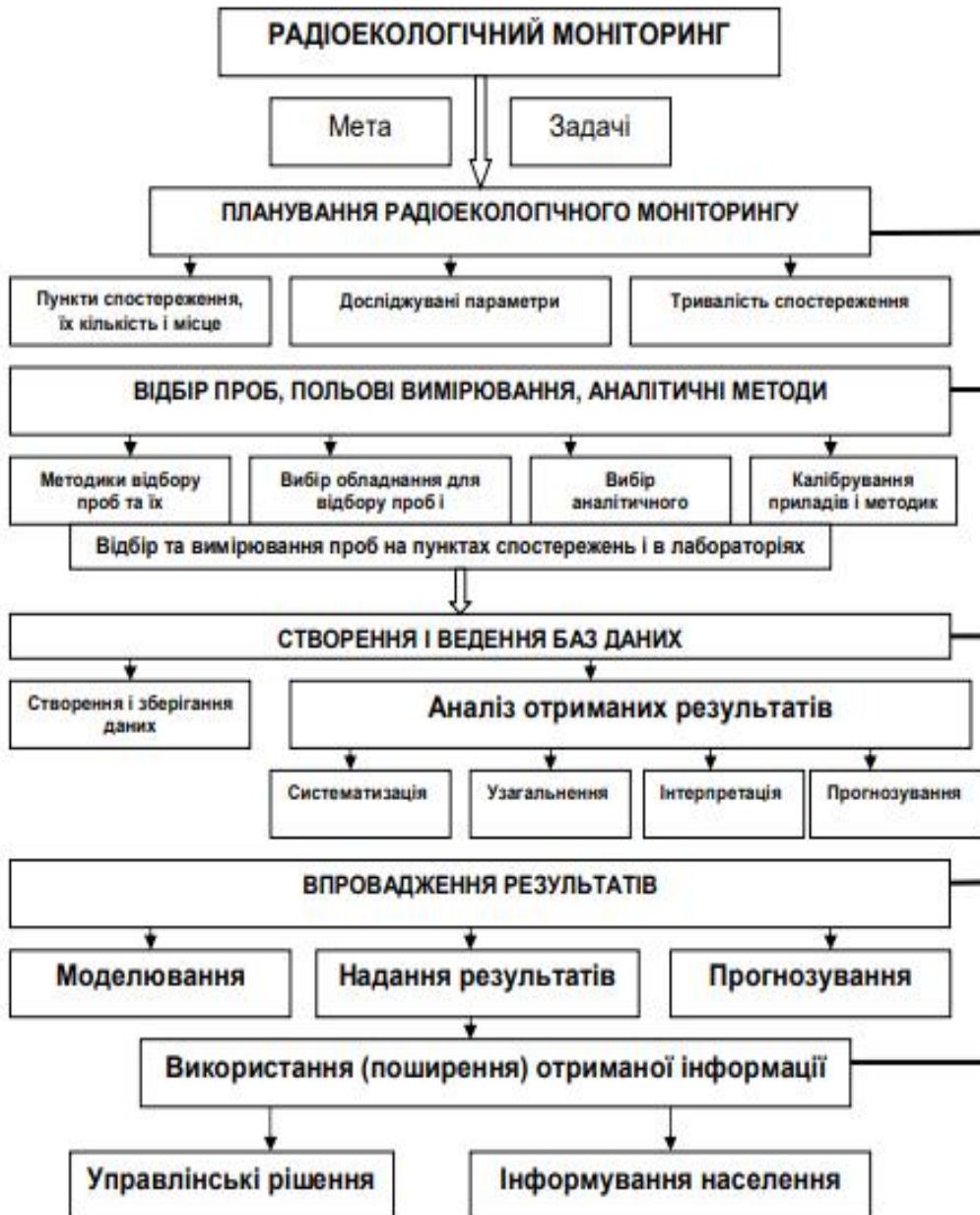
**Радіоактивні ізотопи деяких хімічних елементів та їх
фізико-хімічні особливості**

Елемент	Ізотоп	Переважаюче випромінювання	Енергія випромінювання, МеВ	Фізичний стан	Питома маса, г/см ³	T _{0,5}	Місце депонування	T _б	Група радіаційної небезпеки
Природні ізотопи									
Такі, що утворюють родини, та продукти їх розпаду									
Торій	²³² Th	α	4,07	Метал	11,7	1,4×10 ¹⁰ р.	Легені, печінка, нирки	700 діб	А
Уран	²³⁵ U	α	4,47	Метал	19,0	7,1×10 ⁸ р.	Нирки, печінка, скелет	25, 150,	Б
Уран	²³⁸ U	α	4,27	Метал	19,0	4,5×10 ⁹ р.		450 діб	Б
Радій	²²⁶ Ra	α (γ)	4,86	Метал	5,0	1620 р.	Скелет	17 р.	А
Полоній	²¹⁰ Po	α	5,29	Метал	9,4	138 діб	Нирки, кров, легені	37 діб	А
Радон	²²⁰ Rn	α	6,28	Газ	0,0099	55 с	Легені	3–5 хв.	Г
Радон	²²² Rn	α	5,49	Газ	0,0099	3,8 доби	Легені	10–30 хв.	Г
Такі, що не утворюють родин, або позародинні									
Калій	⁴⁰ K	β і γ	1,325 і 1,459	Метал	0,86	1,3×10 ⁹ р.	М'язи, печінка	58 діб	Г
Рубідій	⁸⁷ Rb	β і γ	0,28 і 0,39	Метал	1,53	6,2×10 ¹⁰ р.	М'язи, печінка	40–80 діб	В
Кальцій	⁴⁵ Ca	β	0,08	Метал	1,50	1×10 ¹⁶ р.	Скелет	20 р.	Г
Космогенні									
Водень	³ H	β	0,019	Газ	0,000089	12,34 р.	М'язи	10–30 діб	Г
Вуглець	¹⁴ C	β	0,155	Газ	0,00125	5730 р.	Печінка, нирки, легені		Г
Штучні ізотопи									
Продукти поділу ядер урану									
Стронцій	^{90,90} Sr	β	1,463 і 0,544	Метал	2,6	50,5 діб і 29 р.	Скелет	30–50 р.	В і Б
Йод	¹³¹ I	β і γ	0,608 і 0,723	Неметал	4,94	8,04 доби	Щитоподібна залоза	120 діб	Б
Цезій	¹³⁴ Cs	β і γ	0,512 і 1,367	Метал	1,87	2,06 р.	М'язи	40–60 діб	Б
Цезій	¹³⁷ Cs	β і γ	0,520 і 0,662			30,17 р.			
Ізотопи трансуранових елементів									
Плутоній	²³⁹ Pu	α	5,23	Метал	19,8	2,41×10 ⁴ р.	Скелет, печінка	200 р.	А
Америцій	²⁴¹ Am	α	5,57	Метал	13,7	432,8 р.	Скелет, печінка	70 р.	А
Продукти наведеної радіоактивності									
Фосфор	³² P	β	1,710	Неметал	1,83	14,3 доби	Скелет, м'язи, печінка	19 і 0,5 доби	В
Сірка	³⁵ S	β	0,167	Неметал	2,07	87,1 доби	Все тіло	60–140 діб	В

Додаток Б

Таблиця 2.

Структурні особливості радіоекологічного моніторингу



Додаток В

Таблиця 3.

План-схема будівлі СВЯП-1 на позначці 0.0

