

---

Національна академія наук України  
Інститут проблем безпеки атомних електростанцій

В. О. КРАСНОВ, А. В. НОСОВСЬКИЙ, С. А. ПАСКЕВИЧ, В. М. РУДЬКО

# ОБ'ЄКТ «УКРИТТЯ» В УМОВАХ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТА

Чорнобиль, 2021

---

*Рецензенти:*

д-р фіз.-мат. наук, проф., академік НАН України Булавін Л. А.;  
д-р біолог. наук, проф., академік НААН України Прістер Б. С.;  
д-р фіз.-мат. наук, проф. Слісєнко В. І.

*Рекомендовано до друку вченою радою*

*Інституту проблем безпеки атомних електростанцій НАН України,  
протокол № 5 від 15 березня 2021 р.*

**О-13**     **Об'єкт «Укриття» в умовах нового безпечного конфайнмента / В. О. Краснов, А. В. Носовський, С. А. Паскевич, В. М. Рудько ; під заг. ред. А. В. Носовського. — Чорнобиль : ІПБ АЕС НАН України, 2021. — 344 с.**  
**ISBN 978-966-02-9577-3**

У монографії, підготовленій за результатами багаторічних наукових досліджень з нагоди 35-х років Чорнобильської катастрофи, наведено опис нового безпечного конфайнмента (НБК), огорожувального контуру, технологічних і допоміжних будівель та комунікацій, системи основних кранів, системи життєзабезпечення, безпеки та контролю. Розглянуто питання ядерної та радіаційної безпеки в умовах НБК, наведено динаміку нейтронної активності й температури паливовмісних матеріалів у процесі змін волого-температурного режиму, які відбулись після накриття об'єкта «Укриття» аркою. Показано напрямки підвищення ефективності забезпечення ядерної безпеки. Зроблено оцінку зміни полів гамма-випромінювання після встановлення НБК в проєктне положення, активності радіоактивних аерозолів та водних скупчень у приміщеннях об'єкта. Проаналізовано вплив об'єкта «Укриття» в умовах конфайнмента на довкілля, розглянуто програми науково-технічного супроводу діяльності з перетворення об'єкта на екологічно безпечну систему. Описано подальші роботи з демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття», реконструкції будівельних частин, що виступають за межі огорожувального контуру, а також потенційні сценарії перетворення об'єкта «Укриття».

Видання рекомендовано спеціалістам атомних електричних станцій, науковим та інженерно-технічним працівникам служб з ядерної безпеки та радіаційного захисту, протияварійного реагування та надзвичайних ситуацій, студентам вищих навчальних закладів, може бути корисним для широкого кола читачів, які бажають отримати та систематизувати свої знання з розглянутих питань.



---

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЕС	— атомна електростанція
АРМ	— автоматизоване робоче місце
АСРК	— автоматизована система радіаційного контролю
АУ	— аспіраційна установка
ББ	— басейн-барботер
БВ	— басейн витримки
ВАВ	— високоактивні відходи
ВТ-2	— вентиляційна труба
ВЧ	— виступаючі частини
ГЧ	— «гарячі» частинки
ДЕ	— деаераторна етажерка
ДІВ	— джерела іонізуючих випромінювань
ДКА	— дистанційно керовані агрегати
ДНАВ	— дуже низькоактивні відходи
ДПО	— доза потенційного опромінення
ЗВР	— зона виконання робіт
ЗІЗ	— засоби індивідуального захисту
ІАЕ	— Інститут атомної енергії
ІАСК	— інтегрована автоматизована система контролю
ІДК	— індивідуальний дозиметричний контроль
ІПБ	— Інститут проблем безпеки
ІСУ	— інтегрована система управління
ЛПВМ	— лавоподібні паливовмісні матеріали
МАГАТЕ	— Міжнародне агентство з атомної енергії
МІП	— мобільна інструментальна платформа
МНТЦ	— Міжгалузевий науково-технічний центр
МСПП	— модернізована система пилопригнічення
НАН	— Національна академія наук
НАВ	— низькоактивні відходи
НБК	— новий безпечний конфайнмент
НВТ	— нова вентиляційна труба
НПМ	— матеріали, що поглинають нейтрони
ОК	— огорожувальний контур
ПБВ	— південний басейн витримки

---

---

ПВМ	— паливовмісні матеріали
ПД	— потужність дози
ПЕД	— потужність експозиційної дози
ПКГЧ	— паливно-конструкційні «гарячі» частинки
ПЛК	— програмований логічний контролер
ПЗЗ ОУ	— План здійснення заходів на об'єкті «Укриття»
ПРК	— паророзподільний коридор
ПСК	— пароскидний клапан
РА	— радіоактивні аерозолі
РАВ	— радіоактивні відходи
РВ	— радіоактивна вода
РРВ	— рідкі радіоактивні відходи
САВ	— середньоактивні відходи
СВОК	— системи вентиляції, опалення і кондиціонування
СВЯП	— сховище відпрацьованого ядерного палива
СКБК	— система контролю будівельних конструкцій
СКСБК	— система контролю стану будівельних конструкцій
СКУ	— система контролю управління
СКЯБ	— система контролю ядерної безпеки
СЛР	— самопідтримуюча ланцюгова реакція
СМР	— спеціальні матеріали, що розщеплюються (або подільні матеріали)
СОК	— система основних кранів
СПП	— система пилопригнічення
СПРГ	— система подачі розчину гадолінію
СПС	— система пожежної сигналізації
СРК	— система радіаційного контролю
ССК	— система сейсмічного контролю
СТРРВ	— сховище твердих і рідких радіоактивних відходів
ТВЗ	— тепловидільна збірка
твел	— тепловидільний елемент
ТРВ	— тверді радіоактивні відходи
ФАЗ	— фрагмент активної зони
ФВУ	— фільтровентиляційна установка
ЦЗ	— центральний зал
ЦПУ	— центральний пульт управління
ЦЩКУ	— центральний щит контролю і управління
ШДПП	— шляз доступу пожежних підрозділів
ЩПН	— щільність потоку нейтронів
ЩУСОК	— щит управління системою основних кранів
АМАД	— медіанний за активністю аеродинамічний діаметр
SIP	— Shelter Implementation Plan

---

## ПЕРЕДМОВА

Об'єкт «Укриття» — законсервований зруйнований четвертий енергоблок Чорнобильської АЕС — було прийнято на технічне обслуговування 30 листопада 1986 року [1]. Збудований у надзвичайно важких радіаційних умовах цей комплекс будівельних захисних споруд та систем контролю, управління та безпеки вже після введення в експлуатацію потребував постійного нагляду, контролю та застосування коригувальних заходів на випадок відхилення параметрів безпеки від установлених норм. Немоżliвість безпосередньої участі людини у монтажі об'єкта «Укриття» обумовлювало використання дистанційних методів будівництва, спричинивши цілу низку недоліків. Зокрема, велика кількість бетону потрапила у приміщення, що значно ускладнило прохід до них та істотно збільшило кількість радіоактивних відходів; відбувся перерозподіл навантажень на будівельні конструкції; існувала невизначеність міцності деяких опор, за які використовувалися старі конструкції, що зазнали впливу аварії [2].

Під час ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС одним з найважливіших і найважчих завдань стало переведення у контрольований стан ядерного палива, що залишилося в об'єкті «Укриття». Треба було визначити місце розташування основних скупчень паливовмісних матеріалів (ПВМ), їхні фізико-хімічні властивості, оцінити ступінь ядерної та радіаційної безпеки, створити системи контролю й підготувати контрзаходи на випадок можливих аварій, у перспективі — вилучити ядерне паливо з об'єкта «Укриття» й захоронити його [3]. Виконання цього завдання розпочалося у перші дні після аварії й тривало протягом усіх 35 останніх років. Незважаючи на успішне вирішення багатьох його окремих складових, комплексного розв'язання проблеми дотепер не досягнуто. ПВМ, що залишилися всередині об'єкта «Укриття», контролюються не повністю [4]. Це змушує вдаватися до надлишкових заходів безпеки, що ґрунтуються на свідомо консервативних припущеннях.

В об'єкті «Укриття» міститься велика кількість дрібнодиспергованого палива, що утворилося під час аварії та після неї внаслідок фізико-хімічного впливу на ПВМ. Паливний пил становить небезпеку внутрішнього опромінення людини й поширення радіоактивних речовин за межі дислокації. У післяаварійний період через руйнування лавоподібних ПВМ утворюється вторинний паливний пил. Швидкість руйнування, а відповідно,

---

й швидкість утворення пилу з часом збільшуються. У лавоподібних ПБМ спостерігаються видимі зміни міцнісних властивостей, що проявляються у розтріскуванні ПБМ, руйнуванні великих фрагментів і посиленні пилогенеруючої здатності [5]. Крім паливного пилу в об'єкті також присутня значна кількість пилу, утворення якого пов'язане з деградацією будівельних конструкцій і руйнуванням сухих пилопригнічувальних покриттів під впливом старіння й кліматичних факторів. Оскільки згадані конструкції й пилопригнічувальні покриття забруднено радіонуклідами, такий пил найчастіше є радіоактивним.

На активній стадії аварії більша частина графітової кладки вигоріла та розсіялася радіоактивним викидом, а менша частина була викинута в реакторний зал, на територію майданчика та покрівлю енергоблока. Частина графіту диспергована внаслідок вибуху й розподілена у вигляді пилу по приміщеннях реакторного відділення.

Одним з основних факторів небезпеки на об'єкті «Укриття» є наявність води, яка змінює розмножувальні системи, а взаємодіючи з ПБМ розчиняє та переносить радіонукліди, які можуть потрапити у довкілля. Крізь нещільності в покрівлі та стінах до об'єкта «Укриття» проникають атмосферні опади. Розміри нещільностей невеликі, проте вся вода, що стікає з похилих ділянок легкої покрівлі на горизонтальні уступи, практично безперешкодно опиняється в підпокрівельному просторі. Атмосферні опади, техногенні розчини й конденсат, рухаючись від верхніх відміток до нижніх, вилуговують найбільш розчинні компоненти бетону. Важкі метали переходять у розчин через корозію металоконструкцій. Внаслідок цих процесів і формується радіонуклідний склад води, яка за вмістом радіонуклідів належить до рідких радіоактивних відходів [6]. Частина активності концентрується в мулистих відкладеннях і в міру висихання в літньо-осінній період несе загрозу як додаткове джерело радіоактивних аерозолів. Інше джерело води в об'єкті «Укриття» — це конденсаційна волога й техногенні розчини.

У воді, що накопичена в низці приміщень об'єкта, містяться розчинні сполуки радіонуклідів урану, плутонію, америцію. Їх утворення пояснюється руйнуванням різних модифікацій палива під дією комплексу факторів, основними з яких є вода, що проникає в об'єкт «Укриття». На концентрацію радіонуклідів у водах об'єкта «Укриття» найбільше впливають температура повітря та інтенсивність опадів. У період плюсових температур інтенсивні опади дещо зменшують концентрацію радіонуклідів у водних середовищах. У холодні й сухі періоди, навпаки, кількість води на нижніх позначках зменшується, час контакту води з конструкціями й скупченнями ПБМ збільшується і, як наслідок, підвищуються концентрації радіонуклідів і солей.

За таких обставин довгострокова безпечна експлуатація об'єкта «Укриття» унеможлиблювалася. Тому вже 1991 року формуються основні підходи до перетворення об'єкта на довгострокову екологічно безпечну систему. 1992 року Уряд України ухвалює

---

рішення про проведення Міжнародного конкурсу проектів і технічних рішень щодо перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему. 1993 року, відповідно до рішення журі Міжнародного конкурсу, видається технічне завдання на розробку техніко-економічного обґрунтування з перетворення об'єкта «Укриття». Одночасно розробляється перелік першочергових заходів щодо підвищення безпеки експлуатації об'єкта.

Перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему мало охоплювати кілька етапів. Перший — стабілізація будівельних конструкцій об'єкта, тобто здійснення комплексу заходів, які спрямовані на довготермінову підтримку його безпеки. Другий — спорудження нової локалізуючої оболонки або нового безпечного конфайнмента (НБК), який би відповідав встановленим нормам і правилам з безпеки під час переробки та видалення радіоактивних матеріалів з об'єкта «Укриття». Третій — вилучення та захоронення паливовмісних та радіоактивних матеріалів, і як кінцева ціль — зняття четвертого блока Чорнобильської АЕС з експлуатації.

Для реалізації перших двох етапів у 1997 році американськими, європейськими та українськими фахівцями розробляється план дій по об'єкту «Укриття» — Shelter Implementation Plan (SIP), що визначив заходи й обсяги робіт з перетворення об'єкта на екологічно безпечну систему [7].

Основний висновок міжнародних експертів зводився до суттєвого зменшення небезпеки для довкілля завдяки зведенню над об'єктом «Укриття» нової захисної споруди — НБК. У Законі України «Про загальні засади подальшої експлуатації і зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблока цієї АЕС на екологічно безпечну систему» сформульовано основні вимоги до НБК. Новий безпечний конфайнмент — це багатофункціональний комплекс для перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему. Отже, НБК має створити безпечні умови як для довкілля, так і уможливити демонтаж конструкцій об'єкта «Укриття» та вилучення ПВМ з четвертого енергоблока.

На першому етапі проекту виконано комплекс стабілізаційних заходів з підвищення довговічності, надійності та ефективності наявних і встановлених нових конструкцій та систем (будівельних, контролюючих, пилопригнічувальних, аварійних) для збереження або підвищення рівня безпеки об'єкта. Найголовніший результат вжитих заходів — встановлення НБК у проектне положення наприкінці 2016 року на Чорнобильській АЕС. Завдяки НБК підвищується рівень радіаційної безпеки внаслідок обмеження радіаційного впливу на персонал, населення та довкілля на весь період його експлуатації; зменшується ймовірність аварійного обвалення після демонтажу нестабільних конструкцій під НБК; забезпечується реалізація стратегії перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему завдяки довговічності конструкцій, можливості демонтажу нестабільних конструкцій та вилученню ПВМ.

---

Створення НБК є тільки початковим етапом перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему. Потрібно провести ще багато наукових досліджень, вжити організаційних і технічних заходів для досягнення кінцевої мети — вилучення ядерних матеріалів з об'єкта, упакування їх у контейнери і розміщення контейнерів у спеціально створеному сховищі [8]. Перелічимо основні наукові проблеми, пов'язані з об'єктом «Укриття», які потребують вирішення та постійної уваги:

- моніторинг рівня ядерної та радіаційної безпеки;
- контроль і прогноз стану ядерних матеріалів;
- поводження з ядерними матеріалами та радіоактивними відходами;
- розробка технологій демонтажу будівельних конструкцій та вилучення ядерних матеріалів.

Кожна з названих наукових проблем тягне за собою величезну кількість досліджень, експериментів, побудову аналітичних моделей і розрахунки.

Науково-технічне супроводження робіт на об'єкті «Укриття» розпочалося 1986 року (одночасно з його проектуванням і будівництвом) групою наукових співробітників Інституту атомної енергії «Курчатовський інститут», які за сприяння інших відомчих та академічних наукових установ виконували передпроектні й поточні дослідження зруйнованого енергоблока. 1987 року на базі цієї групи було створено Комплексну експедицію Курчатовського інституту. 1992 року, після набуття Україною незалежності, правонаступником Комплексної експедиції став Міжгалузевий науково-технічний центр «Укриття» Національної академії наук України, який, у свою чергу, 2004 року був перетворений на Інститут проблем безпеки атомних електростанцій [9]. Співробітники Інституту надавали науково-технічну підтримку з усіх найважливіших радіаційно небезпечних проектів, пов'язаних зі стабілізацією будівельних конструкцій, створенням систем безпеки, перетворенням на екологічно безпечну систему. Вони досліджували радіонуклідний та хімічний склад ПВМ, прогнозували їх поведінку [10]. Було виконано величезний обсяг робіт з вивчення шляхів розповсюдження води всередині об'єкта «Укриття», динаміку її радіонуклідної забрудненості в об'єкті та на проммайданчику. Постійно здійснювалися поточний моніторинг об'єкта, виявлення й вивчення факторів безпеки, проводився аналіз ядерної та радіаційної безпеки, видавалися науково обґрунтовані рекомендації щодо підвищення її рівня.

Після встановлення нового безпечного конфайнмента суттєво змінилися умови температурного та вологісного режимів об'єкта «Укриття». Як саме? На це питання й надає відповіді представлена монографія, що підготовлена на основі результатів багаторічних досліджень, проведених науковцями Інституту проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України у співпраці з Науково-дослідним інститутом будівельних конструкцій, Київським науково-дослідним і проектно-конструкторським інститутом «Енергопроект», фахівцями

---

ДСП «Чорнобильська АЕС» та міжнародного консорціуму NOVARKA за участю українських і зарубіжних компаній.

Монографія складається з шести розділів. У першому наведено опис НБК, огорожувального контуру, технологічних і допоміжних будівель та комунікацій, системи основних кранів, системи життєзабезпечення, безпеки та контролю.

У другому та третьому розділах розглянуто питання ядерної та радіаційної безпеки в умовах НБК, наведено динаміку нейтронної активності й температури ПБМ у процесі зміни температурно-вологісного режиму, які відбулись після накриття об'єкта «Укриття» аркою. Показано напрямки підвищення ефективності забезпечення ядерної безпеки. Зроблено оцінку зміни полів гамма-випромінювання після встановлення НБК в проектне положення, активності радіоактивних аерозолів та водних скупчень у приміщеннях об'єкта.

Вплив об'єкта «Укриття» в умовах конфайнмента на довкілля розглянуто у четвертому розділі.

У п'ятому розділі аналізуються програми науково-технічного супроводження діяльності з перетворення об'єкта на екологічно безпечну систему.

Шостий розділ присвячено опису подальших робіт з демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття», реконструкції будівельних частин, що виступають за межі огорожувального контуру, а також аналізу потенційних сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття».

Видання рекомендовано спеціалістам атомних електричних станцій, науковим та інженерно-технічним працівникам служб з ядерної безпеки та радіаційного захисту, протиаварійного реагування та надзвичайних ситуацій, студентам вищих навчальних закладів, може бути корисним для широкого кола читачів, які бажають отримати та систематизувати свої знання з розглянутих питань.

Автори вважають своїм приємним обов'язком висловити вдячність рецензентам за цінні зауваження до рукопису книги, які враховані авторами під час підготовки остаточної редакції книги: завідувачу кафедри молекулярної фізики фізичного факультету Національного університету України ім. Т. Г. Шевченка, д-ру фіз.-мат. наук, проф., академіку НАН України Л. А. Булавину; головному науковому співробітнику Інституту проблем безпеки атомних електростанцій НАН України, д-ру біолог. наук, проф., академіку НААН України Б. С. Прістеру; директору Інституту ядерних досліджень НАН України, д-ру фіз.-мат. наук, проф. В. І. Слісенку, а також фахівцям ДСП «Чорнобильська АЕС» — В. О. Сейді, А. О. Білику, С. О. Кондратенку та С. В. Кошелеву.



---

## **Розділ 1. СТВОРЕННЯ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТА**

У комплексі завдань, що виникли у зв'язку з аварією на Чорнобильській АЕС, серед безлічі інших постало найважливіше завдання — створення захисної оболонки над зруйнованим ядерним реактором. Роботи зі створення захисної оболонки (об'єкта «Укриття») доручили Міністерству середнього машинобудування колишнього Радянського Союзу, у складі якого було сформовано Управління будівництва № 605, що складалося з кількох будівельних і монтажних підрозділів, бетонних заводів, управлінь механізації, автотранспорту, енергопостачання тощо. Проектування об'єкта «Укриття» вдалося здійснити протягом трьох місяців — з 20 травня по 20 серпня 1986 року. Проектна документація за її готовністю передавалася будівельникам і за потреби уточнювалася або доповнювалася бригадою авторського нагляду. Від моменту ухвалення рішення про зведення об'єкта до закінчення будівництва пройшло лише півроку. Об'єкт «Укриття» був прийнятий Державною комісією на технічне обслуговування 30 листопада 1986 року.

Спорудження об'єкта «Укриття» на зруйнованих конструкціях четвертого енергоблока та в надзвичайно важких радіаційних умовах не дало змоги забезпечити відповідність правилам і нормам проектування не тільки ядерних установок або об'єктів для поводження з радіоактивними відходами, а й відповідність правилам і нормам проектування звичайних промислових споруд. Будівельні конструкції не задовольняють вимоги, які висуваються до структурної цілісності та надійності, і мають невизначений строк експлуатації. З огляду на сказане, потрібні постійне спостереження за станом таких конструкцій і втручання в разі виникнення загрози небезпечного відхилення їх стану від стабільного.

Отже стан об'єкта «Укриття» не давав змоги розраховувати на його довгострокову безпечну експлуатацію. Тому вже 1991 року було сформульовано основні підходи до перетворення об'єкта на довгострокову, екологічно безпечну систему. 1992 року Уряд України ухвалив рішення про проведення Міжнародного конкурсу проектів і технічних рішень щодо перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему. У 1993 році, відповідно до рішення журі Міжнародного конкурсу, було розроблено і видано технічне завдання на розробку техніко-економічного обґрунтування щодо перетворення об'єкта «Укриття»



---

---

і, одночасно, розроблено перелік першочергових заходів щодо підвищення безпечної експлуатації об'єкта.

Отже, від 1993 року Україна спільно з міжнародною спільнотою вживає заходів щодо перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему. У 1997 році українські, американські та європейські фахівці розробили план дій стосовно об'єкта «Укриття» — Shelter Implementation Plan, що визначив заходи й обсяги робіт з перетворення об'єкта на екологічно безпечну систему, будівництва нової захисної оболонки, що має гарантувати безпеку об'єкта принаймні на 100 років. Для фінансового забезпечення SIP було створено Чорнобильський фонд «Укриття». Наприкінці 2016 року відбулося встановлення нового безпечного конфайнмента (НБК) у проектне положення.

### **1.1 Мета створення, основні функції та етапи реалізації проєкту нового безпечного конфайнмента**

У Законі України «Про загальні засади подальшої експлуатації і зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблока цієї АЕС на екологічно безпечну систему» [11] визначено, що «конфайнмент — захисна споруда, що включає в себе комплекс технологічного обладнання для вилучення із зруйнованого четвертого енергоблока Чорнобильської АЕС матеріалів, які містять ядерне паливо, поводження з радіоактивними відходами та інші системи, призначена для здійснення діяльності з перетворення цього енергоблока на екологічно безпечну систему та забезпечення безпеки персоналу, населення і довкілля».

Новий безпечний конфайнмент дає змогу: 1) захистити персонал, населення й довкілля від впливу джерел ядерної та радіаційної небезпеки, пов'язаних з наявністю об'єкта «Укриття»; 2) створити умови для практичної діяльності з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему, зокрема для вилучення залишків ядерного палива і ПВМ, демонтажу/підсилення нестабільних конструкцій та поводження з радіоактивними відходами (РАВ).

Однією з основних функцій НБК є *запобігання розповсюдженню РАВ поза межами НБК* за умов нормальної експлуатації, порушень нормальної експлуатації, аварійних ситуацій та аварій. Ця функція забезпечується:

цілісністю захисних конструкцій НБК протягом тривалого періоду експлуатації (не менше ніж 100 років);

відвертанням загрози обвалення нестабільних конструкцій завдяки їхньому демонтажу або підсиленню на період, що визначається умовами безпечної експлуатації НБК;

обмеженням надходження атмосферних опадів усередину споруди;

захистом гідрогеологічного середовища від забруднення РАВ, що є в НБК;

обмеженням розповсюдження РАВ усередині НБК.

---

Виходячи з наявної радіаційної обстановки поза межами об'єкта «Укриття» і зважаючи на доцільність зниження радіоактивного впливу тільки в зонах перебування персоналу, додаткові вимоги до виконання будівельними конструкціями НБК функцій екранування не висувались. Екранування передбачається тільки в зонах обслуговування конструкцій та систем, а також у зонах виконання інших радіаційно небезпечних робіт.

*Функція технологічного забезпечення* реалізується за допомогою розміщення й функціонування систем та елементів, а також створення відповідних умов для нормальної експлуатації НБК, запровадження заходів з контролю та технічного обслуговування об'єкта «Укриття»; демонтажу/підсилення нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття»; поводження з РАВ; подальшого переведення у контрольований стан/вилучення ПБМ.

*Функція фізичного захисту* полягає у фізичному захисті ядерних та радіоактивних матеріалів, що містяться в об'єкті «Укриття», забезпеченні функціонування системи гарантій МАГАТЕ.

Зазначені функції свідчать про те, що НБК є багатофункціональним об'єктом, експлуатація якого потребує врахування численних взаємозв'язків між наново створеними системами й елементами та з наявними компонентами об'єкта «Укриття».

Згідно зі стратегією реалізації проекту НБК [12] передбачалося три етапи.

**Перший етап** — підготовчі роботи: розбирання берми піонерної стіни; підготовка майданчика будівництва НБК; будівництво нової вентиляційної труби (НВТ); демонтаж наявної вентиляційної труби ВТ-2.

*Берма піонерної стіни* була споруджена 1986 року й використовувалась як майданчик для розміщення монтажного крана ДЕМАГ на кінцевому етапі будівництва об'єкта «Укриття». У 1987—1988 роках її добудували у зв'язку з монтажем нового покриття над машинним залом. Пізніше додатково забетонували поверхні берми для організації відведення води від стін машинного залу. Потреба у розбиранні берми піонерної стіни диктувалася розташуванням у цій зоні фундаментів НБК.

Зважаючи на конструкцію берми, для її розбирання застосовувались різноманітні технології та технічні засоби руйнування бетонних і залізобетонних монолітних конструкцій, демонтажу збірних конструкцій, а також розбирання матеріалів засипки складної структури (щебінь, пісок, ґрунт, бетонні та металеві фрагменти). Роботи виконувались у радіаційно небезпечних умовах, безпосередньо біля об'єкта «Укриття» (рис. 1.1), і закінчились у квітні 2008 року.

*Підготовка майданчика будівництва НБК* охоплювала виконання великого обсягу робіт з очищення та планування території, улаштування котлованів під будівництво фундаментів, а також монтажного майданчика для укрупненого складання конструкцій арки (рис. 1.2). Спочатку демонтували наявні будівлі, споруди й дороги в межах



Рис. 1.1 — Розбирання берми піонерної стіни за допомогою гідромолота



Рис. 1.2 — Підготовка майданчика будівництва НБК

майданчика будівництва, очистили території від різноманітних об'єктів (огорож, залиш конструкцій і матеріалів, рослинності тощо) та вертикальне планування.

Надалі йшли земляні роботи з улаштування котлованів під фундаменти. Оскільки у відведених для цього місцях техногенні ґрунти мали значне радіоактивне забруднення [13], впровадили технологічну схему безпечного поводження з ґрунтами, що охоплювала поопераційний радіаційний контроль і сортування ґрунтів за категоріями залежно від питомої активності. У техногенних ґрунтах виявлялись різноманітні великогабаритні елементи, зокрема механізми (два крани, тягач, землерийна машина), захоронені під час ліквідації аварії 1986 року (рис. 1.3). У процесі виконання підготовчих робіт вилучили приблизно 55 тис. м<sup>3</sup> технологічних матеріалів, забетонували коло 90 тис. м<sup>2</sup> території майданчика будівництва НБК.

*Вентиляційна труба (ВТ-2) Чорнобильської АЕС*, розташована на покрівлі блока В, перешкоджала влаштуванню східного торця НБК, тому потрібен був її демонтаж і спорудження нової вентиляційної труби (НВТ) із введенням в експлуатацію до демонтажу ВТ-2. Після закінчення будівництва НВТ 2012 року на покрівлі третього енергблока одночасно стояли дві вентиляційні труби: НВТ і ВТ-2 (рис. 1.4). ВТ-2 масою коло 330 т демонтували до кінця 2013 року.

Зважаючи на габаритні й масові характеристики ВТ-2, складні радіаційні умови в зонах виконання робіт на площадках обслуговування (потужність дози сягала 3 мЗв/год), демонтаж цієї конструкції виявився надзвичайно складною технологічною



Рис. 1.3 — Механізм, вилучений з котловану



Рис. 1.4 — ВТ-2 (на передньому плані) і НВТ



операцією і здійснювався сімома окремими блоками (кількість блоків визначалась характеристиками унікального вантажопідіймального крана, рис. 1.5), із залученням висококваліфікованого персоналу та реалізацією ефективних заходів з протирадіаційного захисту. Демонтаж окремого блока ВТ-2 продемонстровано на рис. 1.6.

Зняті блоки розміщали на майданчику складування біля третього енергоблока (рис. 1.7). Тут провадили додаткове радіаційне обстеження демонтованих блоків та їх фрагментацію. Після цього фрагменти блоків спецтранспортом перевозили у машинний зал третього енергоблока на тимчасове зберігання.

Після демонтажу ВТ-2 закрили отвір у покритті, забезпечивши теплоізоляцію та захист від проникнення всередину атмосферних опадів.

**Другий етап** — проектування та будівництво захисної споруди (НБК) з технологічними системами життєзабезпечення й потрібною інфраструктурою, а також додатково: а) підготовка робочого проекту демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття»; б) закупівля, монтаж і введення в експлуатацію технологічного обладнання та систем для демонтажу нестабільних конструкцій [12]. Зауважимо, що проектування інфраструктури демонтажу мало розпочатись паралельно з проектуванням НБК, проте, на жаль, така схема проектування не була реалізована.

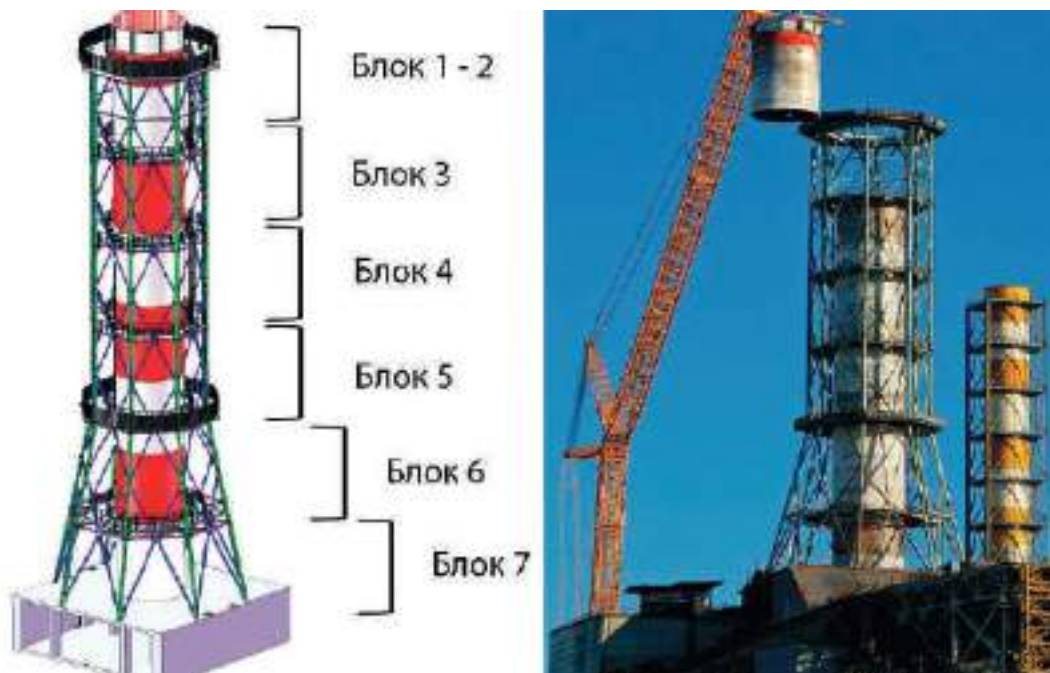


Рис. 1.5 — Поділ вентиляційної труби ВТ-2 на демонтажні блоки



Рис. 1.6 — Демонтаж проміжної частини ствола труби з опорною площадкою



Рис. 1.7 — Демонтовані блоки на майданчику складування

---

---

**Третій етап** реалізації проєкту після введення в експлуатацію НБК — ранній демонтаж нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» в обсягах, визначених на стадії робочого проєктування демонтажу.

## **1.2 Основні конструктивні й технологічні рішення**

Будівельна споруда НБК має три основні складові [14]: сталеву арку, яка зводилась на віддалі від об'єкта «Укриття» з подальшим її насуванням у проєктне положення; наявні та наново зведені будівельні конструкції Чорнобильської АЕС, що виконують функції огорожувального контуру НБК; технологічну будівлю та інші допоміжні будівлі й споруди.

Розташування та перелік основних споруд і будівель НБК наведено на рис. 1.8, загальний вигляд НБК після закінчення будівництва — на рис. 1.9.

### **1.2.1 Арка**

Арка поділена на дві частини — західну та східну, її висота дорівнює 108,935 м, довжина — 162,000 м, ширина — 257,115 м (рис. 1.10). Основна несуча конструкція складається з 16 арокних ферм, розташованих з кроком 12,5 м. У проєктному положенні арокні ферми обпираються на фундаменти через спеціальні опори.

На верхній пояс арокних ферм обпираються прогони зовнішньої обшивки, а до нижнього поясу кріпляться елементи внутрішньої обшивки. Між зовнішньою та внутрішньою обшивками утворюється герметичний кільцевий простір, який захищає конструкції арки від зовнішніх кліматичних впливів і конденсату, що може утворюватися всередині НБК.

На верхніх позначках до арокних ферм кріпляться решітчасті балки, що створюють кранову платформу. До кранової платформи, в свою чергу, кріпляться підкранові балки (рис. 1.11), змонтовані на монтажному майданчику під час складання арки (рис. 1.12).

*Конструктивна схема західної та східної стін арки* складається з системи вертикальних решітчастих колон і горизонтальних решітчастих ферм, а також системи зв'язок. До насування арки західна стіна була повністю підвішена до арки, а в проєктному положенні обпирається однією решітчастою колоною, що розташована в центральній частині стіни, на залізобетонну колону технологічної будівлі. Східна стіна підвішена до арки і не передає ніяких зусиль на конструкції.

Загальна маса повністю складеної арки разом з технологічними системами сягає понад 36 тис. т.

*Технологія складання східної та західної частин арки* (рис. 1.13) полягала в послідовному з'єднанні на монтажному майданчику сегментів, змонтованих з елементів

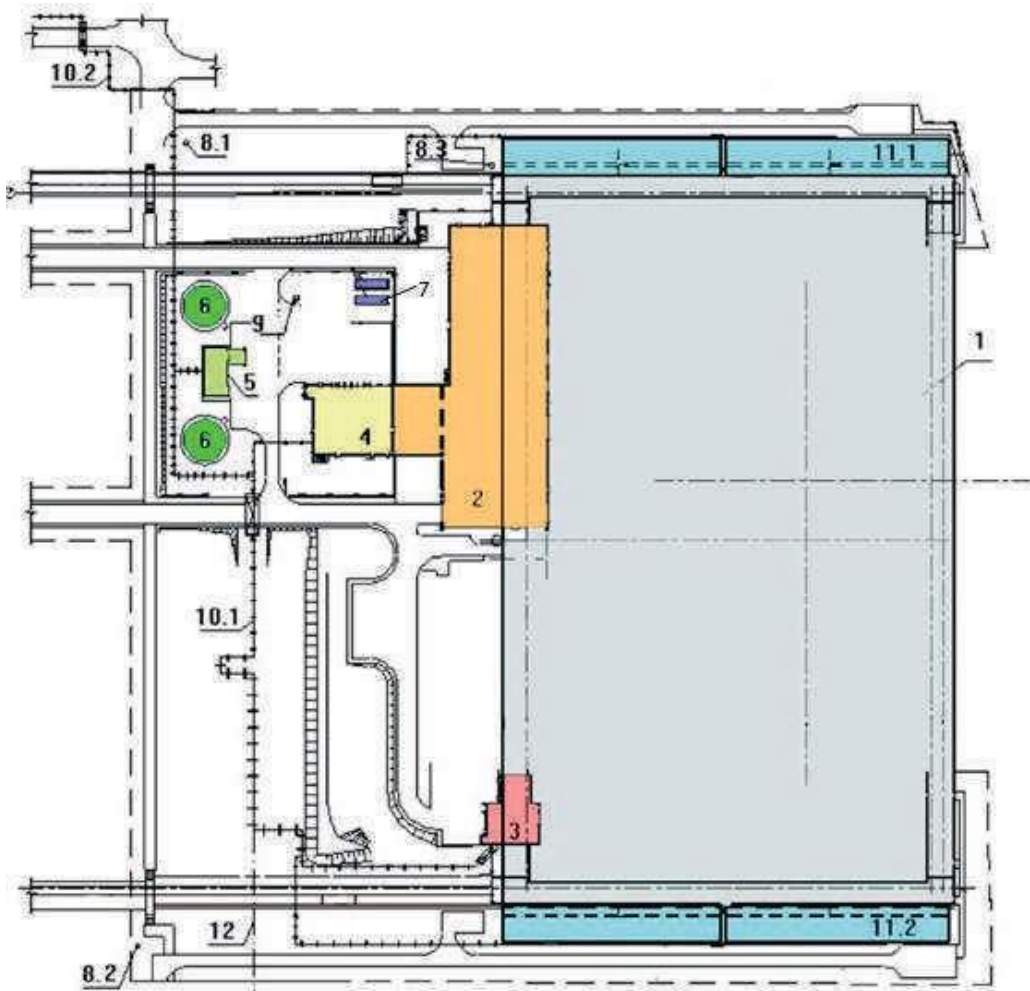


Рис. 1.8 — Схема розташування будівель і споруд НБК:

1 — захисна споруда НБК (сталева арка + огорожувальний контур НБК); 2 — технологічна будівля;  
 3 — шлюз доступу пожежних підрозділів; 4 — будівля електротехнічних пристроїв;  
 5 — насосна станція пожежогасіння; 6 — резервуари пожежогасіння місткістю 1500 м<sup>3</sup> кожна (2 шт.);  
 7 — майданчик дизель-генераторів резервного електропостачання; 8.1 — насосна станція підкачки зливових вод № 1; 8.2 — насосна станція підкачки зливових вод № 4; 8.3 — насосна станція перекачки зливових вод, що не потребують очищення, № 5; 9 — пункт для заправки вилкового навантажувача;  
 10.1 — естакада технологічних трубопроводів, важливих для безпеки; 10.2 — естакада технологічних трубопроводів, що не впливають на безпеку; 11.1 — північний басейн збору зливових вод з арки;  
 11.2 — південний басейн збору зливових вод з арки; 12 — кабельна траса





Рис. 1.9 — Загальний вигляд НБК після закінчення будівництва

заводського виготовлення, і трьох її підйомах. Арку збирали на монтажній платформі на віддалі від об'єкта «Укриття» і потім насували її у проектне положення [5]. Для цього використовували баштові, гусеничні та пневмоколісні крани різної вантажопідйомності, а також спеціальне допоміжне монтажне обладнання (тимчасові опори; обертові балки; рухомі підставки; стопорні пристрої; підйомні балки та вежі; тимчасові розтяжки; з'єднувальні шарніри; домкрати, візки, лебідки тощо).

Перша партія металоконструкцій арки надійшла на монтажний майданчик у лютому 2012 року, а вже 24 листопада того самого року відбувся перший підйом східної частини арки масою 5300 т. Після другого й третього підйомів (рис. 1.14) східну частину масою 12600 т перемістили на 112 м у напрямку захід — схід до зони очікування.

Технологія спорудження західної частини арки в цілому збігалася з технологією спорудження східної, відмінності полягали лише в монтажі східної та західної стін, конструкції яких істотно відрізняються. Після закінчення основних робіт із спорудження західної частини арки східну частину перемістили у бік західної і з'єднали їх в одне ціле.

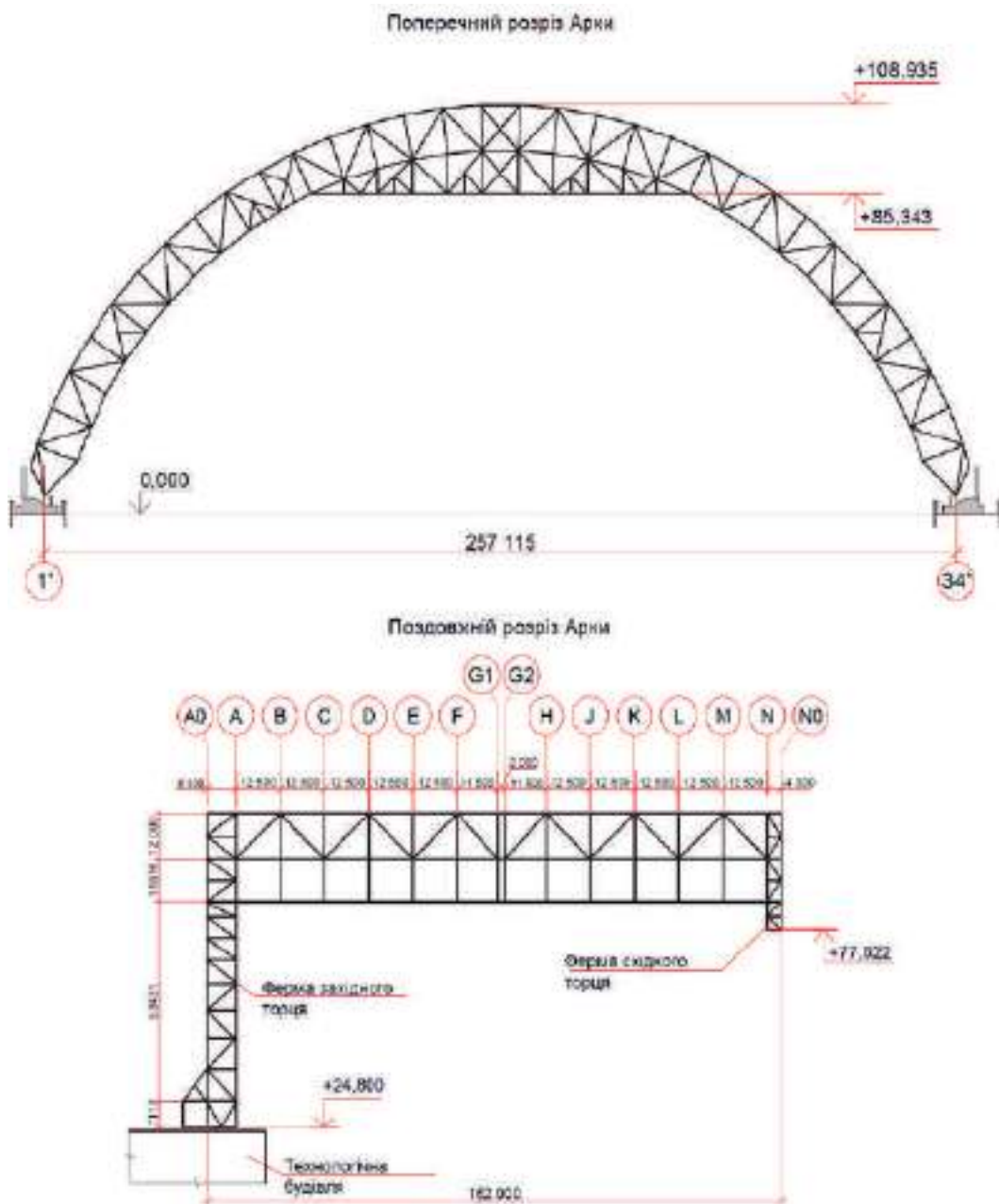


Рис. 1.10 — Конструктивна схема арки

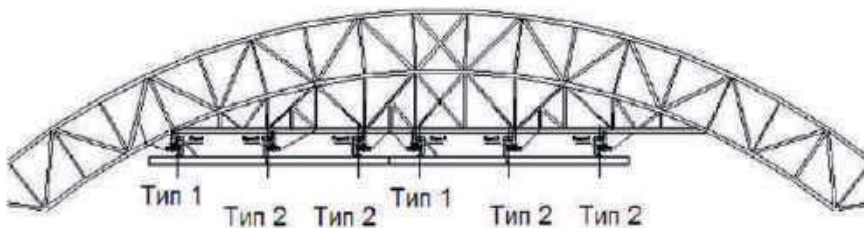


Рис. 1.11 — Схема розташування підкранових балок

Паралельно із складанням арки проводився монтаж торцевих стін арки, підкранових балок, системи основних кранів (СОК), гаражів, закритих екранованих галерей і переходів усередині простору під аркою, сходової клітки та ліфта всередині західної стіни, вентиляційної труби зі сходовою кліткою та галереї системи вентиляції зовні західної стіни, систем вентиляції, електропостачання, освітлення тощо.



Рис. 1.12 — Встановлені на арці підкранові балки



Рис. 1.13 — Складання сегмента арки



після першого підйому



після другого підйому



після третього підйому



східна частина арки в зоні очікування

Рис. 1.14 — Східна частина арки на різних етапах її спорудження





Рис. 1.15 — Арка на монтажному майданчику перед її насуванням у проєктне положення



Рис. 1.16 — Система для насування арки



Рис. 1.17 — Відкидні панелі на східній торцевій стіні



Рис. 1.18 — Герметизація внутрішнього простору арки

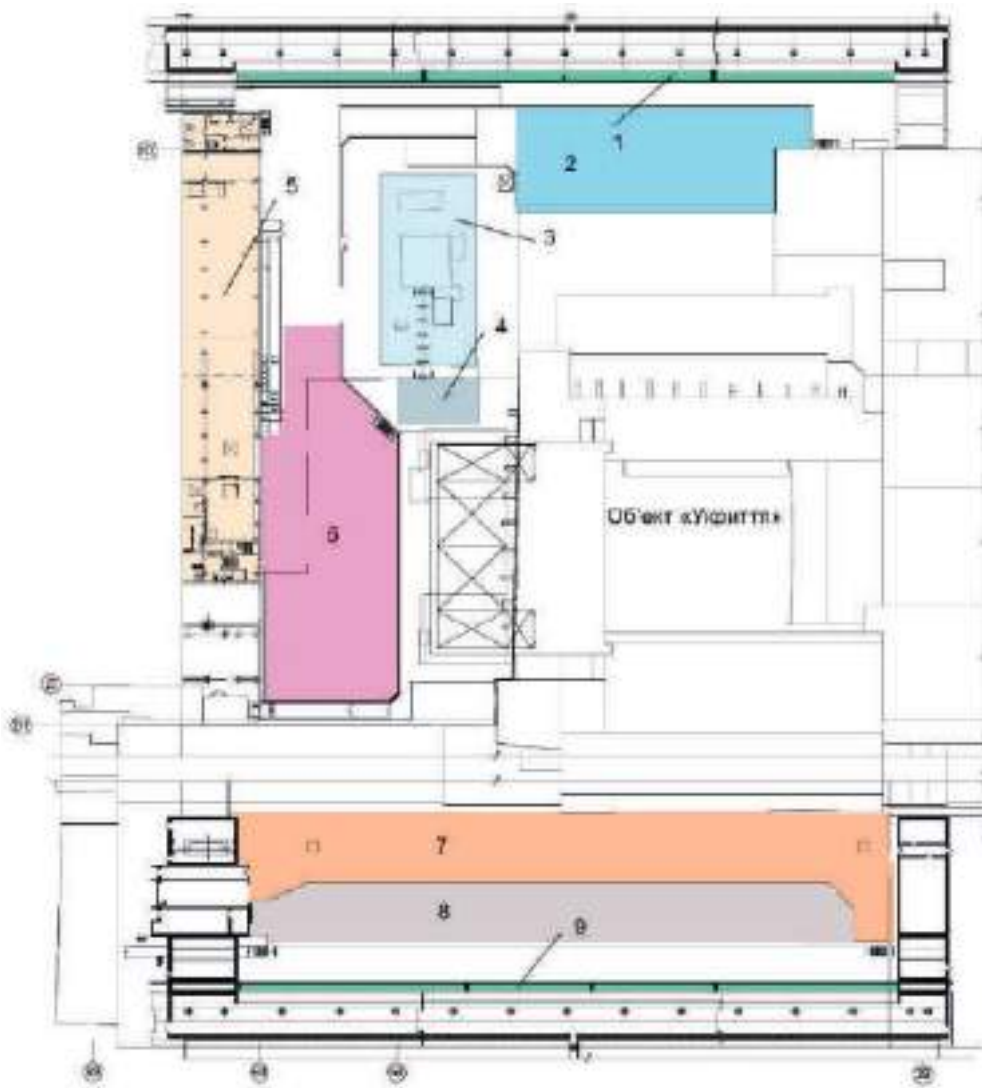


Рис. 1.19 — Розміщення споруд (майданчиків) усередині арки:

- 1 — північний басейн збору води пожежогасіння; 2 — майданчик на каскадній стіні;  
 3 — майданчик наявної системи пилопригнічення; 4 — майданчик нової мобільної системи  
 пилопригнічення; 5 — частина технологічної будівлі; 6 — майданчик тимчасового складування;  
 7 — майданчик для доступу пожежних машин; 8 — майданчик тимчасового зберігання;  
 9 — південний басейн збору води пожежогасіння



Рис. 1.20 — Галерея шарнірних опор

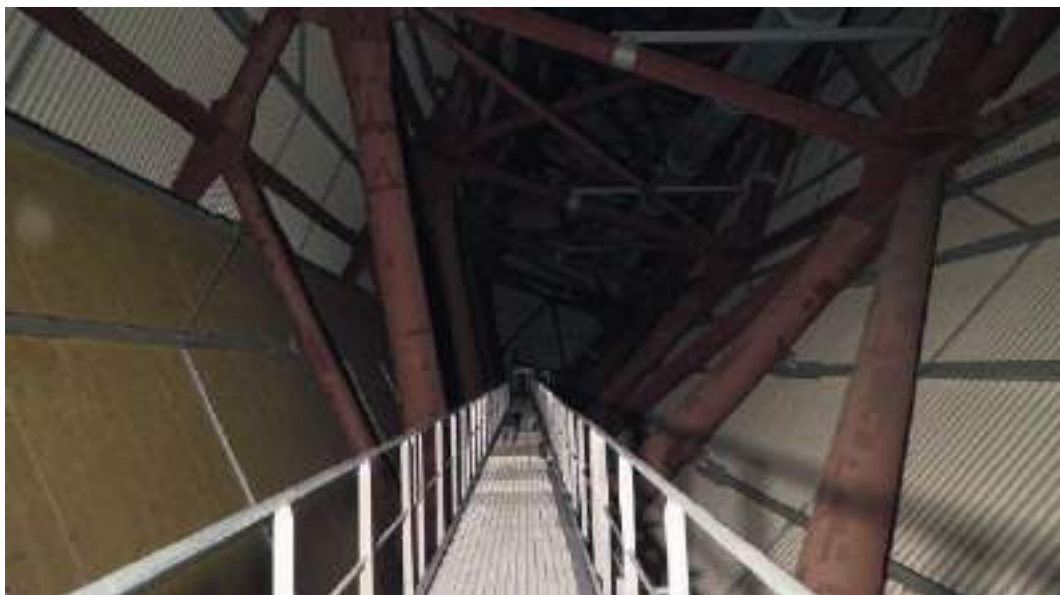


Рис. 1.21 — Галерея кільцевого простору





Рис. 1.22 — Конструкції, що підвішені до західної стіни арки

Загальний вигляд арки на монтажному майданчику перед її насуванням у проєктне положення над об'єктом «Укриття» наведено на рис. 1.15. Процес насування розпочався 14 листопада 2016 року й успішно закінчився 27 листопада цього ж року. Величезну конструкцію масою 36,2 тис. т за допомогою унікальної системи насування (рис. 1.16) перемістили з монтажного майданчика на 327 м і встановили на фундаменти. Для проходження над об'єктом «Укриття» східної торцевої стіни арки в її конструкції передбачили відкидні панелі (рис. 1.17). Під час насування їх підняли, а перед остаточним установленням арки у проєктне положення розвернули.

Нижні вертикальні частини західної та східної торцевих стін арки у стаціонарному положенні примикають до споруд зовнішнього огородження НБК (огороджувального контуру НБК, технологічної будівлі, шлюзу доступу пожежних підрозділів і залізобетонних стін) із зазором близько 1,5 м по всій довжині примикання.

Конструкції арки з'єднані із спорудами зовнішнього огородження НБК гофрованими мембранами шевронного типу (рис. 1.18). Такі мембрани спеціальної форми забезпечують герметизацію внутрішнього простору арки, а також компенсують взаємні переміщення між аркою і спорудами зовнішнього огородження НБК. Спеціальні випробування показали, що матеріал гофрованих мембран може піддаватися радіаційному впливу протягом 100 років дозою в 300 кГр, що втричі перевищує очікувану дозу за вказаний період.

---

---

Усередині НБК розташовано споруди (майданчики) для демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» та іншої поточної діяльності (рис. 1.19).

Щоб забезпечити контроль та технічне обслуговування фундаментів і шарнірних опор арки, облаштовано галерею шарнірних опор (рис. 1.20), а для контролю та технічного обслуговування несучих конструкцій — галерею кільцевого простору (рис. 1.21).

Всередині арочного простору на несучих конструкціях арки закріплені гараж техобслуговування та гараж зберігання СОК, а зовні до західної стіни арки підвишені вентиляційна труба, зовнішні сходи та вентиляційні центри (рис. 1.22).

Гараж техобслуговування призначений для техобслуговування і ремонту візків СОК, мобільної інструментальної платформи і візка техобслуговування. Також у цьому гаражі можна здійснювати заміну інструментів на МІП, дезактивацію вантажних візків СОК.

Гараж зберігання слугує місцем стоянки для вантажних візків СОК або для переміщення вантажних візків з одного моста на інший.

Вентиляційна труба призначена для контрольованого викиду в атмосферу повітря, що видаляється витяжними вентиляційними системами з основного об'єму арки і технологічної будівлі. Внутрішній діаметр вентиляційної труби дорівнює 3,5 м, а довжина — 91,654 м.

### **1.2.2 Огороджувальний контур**

Огороджувальний контур (ОК), як і арка, є важливою складовою НБК. ОК організований у межах наявних будівельних конструкцій Чорнобильської АЕС. Його основна функція — запобігати поширенню радіоактивних речовин поза межами НБК в умовах нормальної експлуатації, порушень нормальної експлуатації, аварійних ситуацій і аварій. Ця функція має забезпечуватися цілісністю конструкцій ОК НБК протягом 100 років беручи до уваги всі види впливів, що підлягають урахуванню, зокрема екстремальні.

До складу ОК НБК входять наявні й наново споруджені будівельні конструкції Чорнобильської АЕС.

*Східний торець* у межах машинного залу складається із залізобетонного фундаменту і залізобетонної стіни з контрфорсами (рис. 1.23). Нижня плита фундаменту 12,0 м завширшки і 2,7 м заввишки розташована в підвальній частині машинного залу, а верхня плита 6,0 м завширшки і 1,0 м заввишки розташована на позначці 12,000. Між собою плити з'єднані системою пілонів.

Вище позначки 13.000 запроектовано монолітну залізобетонну стіну 400 мм завтовшки з контрфорсами. Контрфорси розташовані з обох боків стіни (в одній площині з пілонами) і мають змінний переріз.

До складу східного торця ОК НБК у межах деаераторної етажерки, блоків В і допоміжних систем реакторного відділення (ДСРВ) входять наявні несучі конструкції

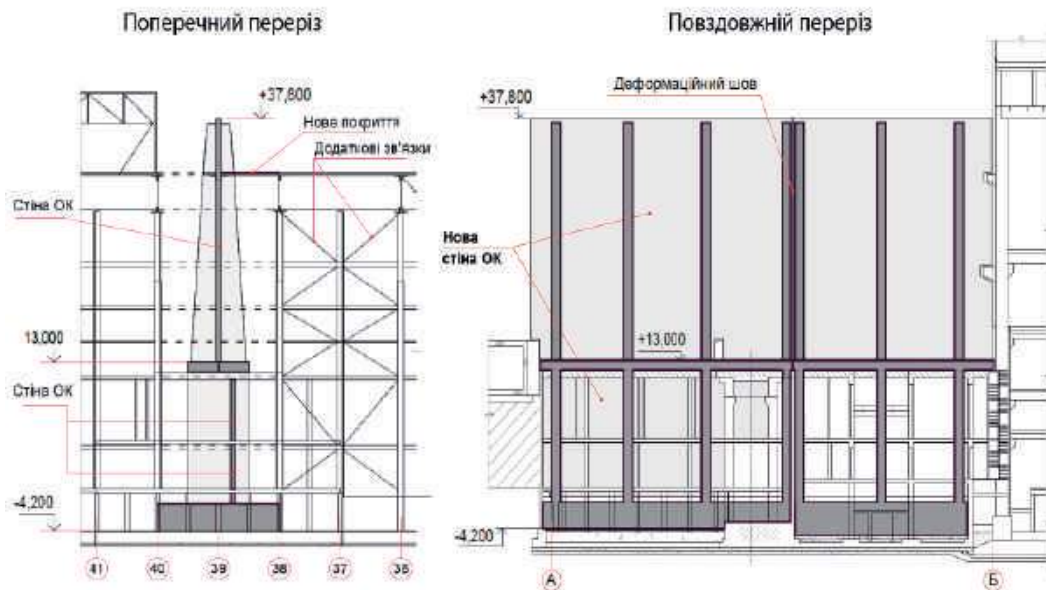


Рис. 1.23 — Конструкція східного торця ОК НБК у межах машинного залу

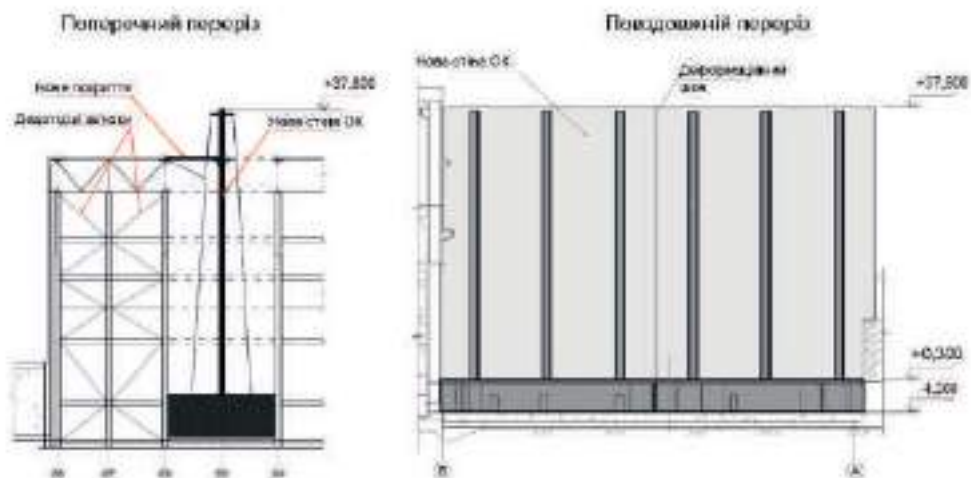


Рис. 1.24 — Конструкція західного торця ОК НБК у межах машинного залу

---

збірного залізобетонного каркаса й залізобетонні перекриття, а також нові стіни й діафрагми з монолітного залізобетону 400 мм завтовшки. Отже, східний торець є поєднанням наявних конструкцій і наново побудованих монолітних залізобетонних стін.

*Західний торець* у межах машинного залу запроєктовано у вигляді залізобетонної стіни з контрфорсами, яка спирається на залізобетонний фундамент (рис. 1.24). Монолітний залізобетонний фундамент виконано у вигляді плити 4,5 м заввишки та 11,2 м завширшки, що спирається на наявну фундаментну плиту машинного залу.

Західний торець ОК НБК у межах деаераторної етажерки являє собою наявні несучі конструкції збірного залізобетонного каркаса та залізобетонні перекриття, а також нові стіни й діафрагми з монолітного залізобетону 400 мм завтовшки.

Значна частина робіт виконувалась у надзвичайно складних умовах усередині об'єкта «Укриття» (високі радіаційні поля, наявність технологічного обладнання, захащеність приміщень тощо) [15]. Стан зони виконання робіт до початку будівництва західної стіни ОК НБК у машинному залі наведено на рис. 1.25, у процесі будівництва — на рис. 1.26.



Рис. 1.25 — Зона будівництва західної стіни ОК НБК у машинному залі



---

Будівництво ОК НБК охоплювало комплекс робіт, а саме:  
підготовчі роботи, пов'язані з організацією будівельного майданчика, установкою вантажопідіймальних механізмів та тимчасових будівель, облаштуванням шляхів доступу персоналу тощо;

демонтаж діючого технологічного обладнання, трубопроводів та кабельних розв'язок, що потрапляють у зону будівництва ОК НБК, а надалі — монтаж на новому місці;

демонтаж виведеного з експлуатації обладнання та комунікацій, а також будівельних конструкцій, що потрапляють у зону будівництва ОК НБК;

видалення горючих матеріалів на покрівлі наявних конструкцій у місцях примикання східного й західного торців НБК;

монтажні та бетонні роботи під час зведення нових стін/підсилення наявних стін ОК НБК.

Будівництво ОК НБК тривало 35 місяців. У стіни західного й східного торців ОК НБК в межах машинного залу укладено близько 14 000 м<sup>3</sup> бетону і 1450 т арматури.



Рис. 1.26 — Будівництво західної стіни ОК НБК у машинному залі



Рис. 1.27 — Східний торець огорожувального контуру НБК

Загальний вигляд східного торця ОК НБК у машинному залі на завершальному етапі будівництва наведено на рис. 1.27.

8 листопада 2017 року відбулося підписання акта про закінчення будівництва та готовність до експлуатації об'єкта «Підсилення та герметизація будівельних конструкцій Чорнобильської АЕС, що виконують функції огорожувального контуру НБК». 22 січня 2019 року Державна інспекція ядерного регулювання України видала Чорнобильській АЕС окремий дозвіл на право провадження діяльності з експлуатації наявних будівельних конструкцій АЕС, які виконують функції ОК НБК, після їх підсилення та герметизації.

---

### 1.3 Технологічна будівля та інші допоміжні будівлі й споруди

**Технологічна будівля** розташована в районі західної стіни арки і частково — всередині аrochenого простору. Вона містить низку конструктивних блоків та споруд (рис. 1.28): технологічний блок; додатковий блок; блок центрального щита управління; прибудову для системи поводження з рідкими радіоактивними відходами (РРВ); блок фільтрів НЕРА; споруду для входу в об'єкт «Укриття».

Технологічний блок, обладнаний електричним мостовим краном вантажопідйомністю 20 т, — це одноповерхова споруда 103,20 м завдовжки і 14,80 м заввишки. Товщина зовнішніх стін — 600 мм, товщина плити покриття — 400 мм, що відповідає вимогам радіаційного захисту (екранування). До складу технологічного блока входять північний шлюз, південний шлюз та вбудовані приміщення.

Північний шлюз призначений для вивезення автотранспортом з НБК контейнерів, які містять РАВ, на об'єкти поводження з РАВ Чорнобильської АЕС, для доступу пожежної техніки, а також виїзду вилочного навантажувача, що працює всередині арки, до пункту заправки дизпаливом. До складу північного шлюзу входять приміщення перевантаження контейнерів, приміщення дезактивації автотранспорту й повітряний шлюз. Між собою ці приміщення розділені герметичними воротами.

Південний шлюз призначений для провезення в НБК обладнання, транспортування великогабаритних фрагментів демонтованих конструкцій об'єкта «Укриття», а також для доступу пожежної техніки. До складу південного шлюзу входять розсувні ворота й повітряний шлюз. У повітряному шлюзі виконують радіаційний контроль і дезактивацію автотранспорту.

Для поводження з твердими радіоактивними відходами (ТРВ) у технологічному блоці розташовано приміщення (майданчики) з радіометричною лабораторією та цехом технічного обслуговування обладнання, де виконують первинну обробку й підготовку РАВ, дезактивацію обладнання, автотранспорту і контейнерів.

У додатковому блоці облаштовано комори інвентаря, реагентів, засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), приміщення дезактивації ЗІЗ, гардероби, медпункт, санвузли та інші допоміжні приміщення.

На блоці центрального щита управління містяться центральний щит контролю і управління (ЦЩКУ), щит управління системою основних кранів (ЩУСОК), приміщення пристроїв зв'язку з об'єктом, серверне та інші приміщення (рис. 1.29).

Одноповерхова прибудова для системи поводження з РРВ розташована з північного боку технологічного блока на спільній фундаментній плиті. Тут є приміщення приймання трапних вод, приміщення баків трапних вод і РРВ, приміщення насосів трапних вод і РРВ, інші приміщення. Залізобетонні стіни й покриття мають товщину 600 мм.

Споруда для входу в об'єкт «Укриття» розташована з південного боку технологічного блока.



Рис. 1.28 — Споруди біля західного торця арки:

- 1 — технологічний блок; 2 — додатковий блок; 3 — блок центрального щита управління;  
 4 — будівля електротехнічних пристроїв; 5 — прибудова для системи поводження з РРВ;  
 6 — південний шлюз; 7 — північний шлюз; 8 — споруда для входу в об'єкт «Укриття»;  
 9 — шлюз доступу пожежних підрозділів



Рис. 1.29 — Блок центрального щита управління



---

---

**Допоміжні будівлі та споруди** поділяються на два види залежно від того, чи належать їхні конструкції до систем, важливих для безпеки, чи ні.

*Будівлі та споруди, конструкції яких належать до систем, важливих для безпеки* (див. рис. 1.28): будівля електротехнічних пристроїв; шлюз доступу пожежних підрозділів (ШДПП); насосна станція протипожежного водопостачання з двома резервуарами запасу води місткістю 1500 м<sup>3</sup> кожен; майданчик дизель-генераторів резервного електропостачання, на якому встановлено два дизель-генератори (один потужністю 1350 кВт · А, інший — 730 кВт · А); ділянка естакади технологічних трубопроводів; ділянка кабельної траси.

*Будівлі та споруди, конструкції яких не належать до систем, важливих для безпеки*: насосні станції підкачки (перекачки) зливових вод №№ 1, 3, 4 і 5; очисні споруди зливової каналізації; майданчик для заправки вилочного навантажувача (з паливно-заправним пунктом і підземним резервуаром для дизельного палива місткістю 3,0 м<sup>3</sup>); фундамент під підземний резервуар запасу дизельного палива місткістю 5,0 м<sup>3</sup> для дизель-генераторів; північний та південний басейни збору зливових вод з арки; ділянка естакади технологічних трубопроводів; ділянка кабельної траси; підпірні стіни на проммайданчику НБК; щогли та опори освітлення території проммайданчика НБК.

У будівлі електротехнічних пристроїв розташовано системи життєзабезпечення НБК, приміщення розподільних пристроїв власних потреб, приміщення трансформаторів, акумуляторні, майстерні. У частині приміщень розташовано обладнання систем водопостачання, вентиляції, насосної господарсько-побутових стоків.

Будівля ШДПП містить станцію пінного пожежогасіння та розподільний пристрій власних потреб 0,4 кВ, транспортний повітряний шлюз, приміщення припливного вентиляційного центру і коридор.

Насосна станція пожежогасіння слугує для подачі води на потреби пожежогасіння. Будівля обладнана підвісною кран-балкою та монорейкою вантажопідйомністю 3,2 т та 10,0 т відповідно.

Північний та південний басейни збору зливових вод з арки розташовуються вздовж фундаментів сервісної зони і мають такі розміри: довжина 163,30 м, ширина 13,00 м, глибина 1,50 м. Дно (600 мм завтовшки) і стіни (400 мм завтовшки) басейнів виконані з монолітного залізобетону.

## **1.4 Система основних кранів**

Система основних кранів функціонально забезпечує демонтаж нестабільних будівельних конструкцій об'єкта «Укриття», а в майбутньому — діяльність з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему (вилучення ПВМ та інших РАВ) і зняття з експлуатації.

---

До складу СОК входить таке основне обладнання: два мости 96,0 м завдовжки кожен і три візки: стандартний вантажний вантажопідйомністю 50 т; спеціальний безпечний вантажний візок вантажопідйомністю 50 т; вантажний візок, обладнаний мобільною інструментальною платформою (МІП).

Міст крана складається з двох кранових балок. Кранові балки — зварні, коробчастого перетину, на кожній розташована одна з рейок, по яких переміщаються вантажні візки (рис. 1.30).

Мости крана пересуваються по рейках підкранових колій і мають підвісну конструкцію. Оскільки довжина моста велика (96 м), кожен з мостів рухається по шести підкранових коліях. Довжина кожної підкранової колії — 150 м. Мости кранів переміщуються в напрямку схід — захід, а візки — в напрямку північ — південь (рис. 1.31).



Рис. 1.30 — Конструкція моста крана, підготовленого до установки на підкранові балки на монтажному майданчику



Рис. 1.31 — Загальний вигляд системи основних кранів

Щоб збільшити довжину ходу візків, мости обладнані консолями в північному і південному напрямках й захоплюють з північного боку північну контрфорсну стіну, а з південного — балку «Восьминіг».

Стандартний вантажний візок вантажопідйомністю 50 т обладнаний підйомним пристроєм з одним електродвигуном.

Спеціальний безпечний вантажний візок оснащений одним головним механізмом підйому вантажу та одним аварійним механізмом підйому. Вантажопідйомність кожного механізму — 50 т. Основний барабан використовується в режимі нормальної роботи крана. Аварійний барабан у цьому режимі залишається у вихідному положенні й використовується тільки для підйому/опускання вантажу до безпечного стану в разі виходу з ладу основного барабана при навантаженому візку.

Вантажний візок з МІП обладнаний спеціальною строповою системою. МІП складається з верхньої та нижньої платформ (рис. 1.32). Нижня підвішена на шести канатах, які створюють просторову трикутну фермову конструкцію. МІП пристосована для монтажу обладнання та забезпечена системою електроживлення.

Щоб організувати технічне обслуговування та виконання ремонтних робіт СОК, в арці на рівні зони руху візків передбачені два гаражі: основний — для технічного обслуговування й дезактивації (розташований у північній частині будівлі); південний —



Рис. 1.32 — Вантажний візок, обладнаний мобільною інструментальною платформою

для зміни або зберігання візка (розташований на південному боці над машинним залом). Вантажні візки можуть переходити з одного моста на інший за допомогою перегону їх у гаражі з будь-якого кінця моста на сусідній міст. Гараж технічного обслуговування з розміщеним у ньому вантажним візком, обладнаним МІП, наведено на рис. 1.33.

На випадок відмови одного з мостів, СОК оснащена засобами аварійного виведення його за допомогою іншого моста.

Управління СОК здійснюється дистанційно з приміщення ЦЦКУ.

### **1.5 Системи контролю та управління**

Для управління основним технологічним обладнанням, моніторингу експлуатаційних параметрів і основних характеристик НБК передбачена інтегрована система управління (ІСУ). Разом з іншими системами та підсистемами, ІСУ забезпечує ядерну, радіаційну та промислову безпеку НБК підтримкою в робочому стані обладнання та використанням мінімальної кількості персоналу. Система побудована на базі





Рис. 1.33 — Гараж технічного обслуговування з розміщеним у ньому вантажним візком, обладнаним мобільною інструментальною платформою

сучасних, високопродуктивних, цифрових програмно-технічних засобах. За впливом на безпеку віднесена до системи нормальної експлуатації, важливої для безпеки. Являє собою розподілену по технологічному, функціональному і територіальному принципу систему, в яку інтегруються системи контролю та управління різного призначення й функцій. Запроєктована з урахуванням злиття з інтегрованою автоматизованою системою контролю (ІАСК) об'єкта «Укриття» і має забезпечити постійний контроль та управління різними системами НБК протягом усього терміну служби.

Інтегрована система управління взаємодіє з такими основними системами: системою основних кранів; системою контролю будівельних конструкцій та системою сейсмічного контролю; системою радіаційного контролю; інтегрованою автоматизованою системою контролю об'єкта «Укриття»; системою електропостачання та електрообладнання; системою протипожежного захисту; системою контролю доступу; системою зв'язку; системою промислового телебачення; системою водопостачання.

*Взаємодія з системою основних кранів.* Для зв'язку між технічними засобами системи контролю та управління СОК передбачені промислова мережа Ethernet

---

---

і бездротова мережа радіоуправління. У режимі нормальної експлуатації управління СОК здійснюють з приміщення щита управління СОК, де розміщені командне автоматизоване робоче місце (АРМ), АРМ стандартного візка, АРМ спеціального безпечного візка, АРМ МІП і резервне АРМ. Для виконання деяких конкретних операцій і процедур техобслуговування СОК всередині арки передбачено переносний пульт управління СОК. У разі втрати зв'язку між АРМ операторів і компонентами СОК візками і мостами можна управляти локально за допомогою засобів управління на цих компонентах або з використанням бездротового переносного аварійного пульта управління. Переносний аварійний пульт управління дає змогу контролювати будь-який компонент СОК і використовує альтернативний спосіб зв'язку — радіозв'язок. Всі команди управління СОК та інформація зворотного зв'язку від компонентів СОК обробляються керуючим програмованим логічним контролером СОК.

*Система контролю будівельних конструкцій і сейсмічного контролю.* Ця система здійснює сейсмічний та метеорологічний контроль; контроль корозії конструкцій, деформацій конструкцій і фундаментів арки; тривимірну зйомку об'єктів НБК. Забезпечує комплексну обробку даних; відображення інформації; архівування та документування; оцінку стану арки; діагностику технічних і програмних засобів; надання інформації в ІСУ.

*Система радіаційного контролю (СРК) НБК.* Це комплекс технічних засобів і організаційних заходів, спрямованих на забезпечення норм радіаційної безпеки з метою неперевищення встановлених лімітів доз (принцип неперевищення); скорочення до розумно досяжного мінімуму рівнів індивідуальних доз і кількості персоналу, що опромінюється (принцип оптимізації, ALARA); нерозповсюдження радіоактивних забруднень між зонами виконання робіт (з різними радіаційними параметрами) та в довкілля. Забезпечує вимірювання параметрів, за якими оцінюють вплив об'єкта на персонал і довкілля, а також параметрів, за якими визначають роботу технологічних систем і стан технологічного обладнання.

Технічні засоби СРК забезпечують такі види радіаційного контролю: радіаційний технологічний контроль; радіаційний дозиметричний контроль; індивідуальний дозиметричний контроль (ІДК); радіаційний контроль довкілля; радіаційний контроль нерозповсюдження радіоактивних забруднень.

У структурі СРК передбачено безперервний дистанційний контроль за допомогою стаціонарних засобів; контроль за допомогою переносних приладів; контроль методом відбору проб середовищ з подальшою обробкою й вимірюванням у лабораторії.

Система радіаційного контролю НБК складається з двох частин: 1) обладнання та засобів індивідуальної дозиметрії (зокрема теледозиметрії), які є розширенням системи ІДК Чорнобильської АЕС; 2) пристроїв та засобів СРК, призначених для безперервного вимірювання параметрів радіаційного стану в приміщеннях НБК,



---

---

радіаційного контролю персоналу. СРК підключена до ІСУ НБК. Кожна з цих двох частин має дворівневу архітектуру з нижнім рівнем для вимірювань, обробки та збору даних і верхнім рівнем для запису, передавання, відображення та прогнозування даних.

Основою технічного оснащення СРК для безперервного і періодичного контролю є автоматизована СРК (АСРК), до складу якої входять пристрої детектування потужності дози гамма-випромінювання зі світлозвуковими сигналізаторами; пристрої детектування об'ємної активності альфа- і бета-активних аерозолів зі світлозвуковими сигналізаторами; пристрої вимірювання радіоактивного забруднення повітря у вентиляційній трубі; пристрої для індивідуального контролю радіоактивного забруднення рук, ніг і одягу; лабораторне обладнання; джерела для калібрування обладнання; портативні пристрої радіаційного контролю; віддалені термінали управління (станції збору та обробки даних); програмований логічний контролер і сервер додатків АСРК; дубльована мережа збору даних АСРК; обладнання автоматизованої системи ІДК.

*Система контролю доступу.* Призначена для контролю та керування доступом персоналу всередину арки, в технологічну будівлю й будівлю електротехнічних пристроїв. Є автономною системою НБК, не інтегрується в загальну систему контролю доступу в об'єкт «Укриття» та інші об'єкти Чорнобильської АЕС. Управління системою контролю доступу здійснюється з автоматизованого робочого місця оператора системи контролю доступу, розташованого в приміщенні ЦЩКУ. Усі точки контролю доступу оснащені відеокамерами.

## **1.6 Системи життєзабезпечення**

Функції життєзабезпечення НБК виконують система вентиляції, опалення і кондиціонування; система електропостачання; система протипожежного захисту; система поводження з РАВ; система дезактивації; система пилопригнічення; система водопостачання і каналізації; система стисненого повітря; система освітлення; система блискавкозахисту; система промислового телебачення; система зв'язку та оповіщення.

**Системи вентиляції, опалення і кондиціонування (СВОК).** Виконані роздільно для арки, технологічної будівлі, будівлі електротехнічних пристроїв, шлюзу доступу пожежних підрозділів.

*Функції СВОК арки* (кільцевого простору та основного об'єму): забезпечення напрямку потоку повітря із зон потенційно низького забруднення до зон потенційно високого забруднення; підтримка рівня радіоактивних викидів у атмосферу в установлених [14] межах; забезпечення мінімально допустимої швидкості припливного повітря для запобігання підйому та перенесення пилу; запобігання утворенню

---

---

легкозаймистих і вибухонебезпечних парів, газів і пилових сумішей в межах, що перевищують установлені [14] значення; запобігання поширенню диму та продуктів горіння у разі виникнення пожежі; підтримка в кільцевому просторі арки відносної вологості нижче ніж 40 % для запобігання утворенню конденсату і, відповідно, атмосферній корозії сталевих конструкцій арки; запобігання конденсації на внутрішній обшивці арки (запобігання утворенню РРВ).

Підтримка температурного та вологісного режиму всередині кільцевого простору арки досягається подаванням осушеного атмосферного повітря.

*Функції СВОК технологічної будівлі:* забезпечення напрямку потоку повітря із зон потенційно низького забруднення до зон потенційно високого забруднення; підтримка рівня радіоактивних викидів до атмосфери в установлених [14] межах; захист шляхів евакуації персоналу від впливу небезпечних факторів пожежі (диму); підтримка оптимальних параметрів довкілля для безпеки та комфорту персоналу.

Основною метою системи вентиляції північного та південного повітряних шлюзів є запобігання забрудненню довкілля через спрямування повітряного потоку ззовні всередину НБК.

Організований викид з арки і технологічної будівлі здійснюється через вентиляційну трубу, підвішену до західного торця арки.

*Функції СВОК будівлі електротехнічних пристроїв:* підтримка оптимальних параметрів довкілля для безпеки й комфорту персоналу; забезпечення незалежної системи припливної вентиляції з аерозольними фільтрами для ЦЩКУ; захист шляхів евакуації персоналу від впливу небезпечних факторів пожежі (диму).

У ілюзії доступу пожежних підрозділів прийнято повітряне опалення, суміщене з припливною вентиляцією.

**Система електропостачання.** Розрахована на електроживлення усіх споживачів НБК в режимі нормальних умов експлуатації, у разі порушень нормальних умов експлуатації та проєктних аварій. У складі системи електропостачання — обладнання для підтримки функціонування всіх систем, які забезпечують виконання технологічних операцій щодо поводження з РАВ, а також роботу систем, що забезпечують експлуатацію НБК, контроль технологічного процесу, роботу систем моніторингу, освітлення, зв'язку, радіаційного контролю, вентиляції.

Електропостачання НБК передбачається від наявного розподільчого пристрою 6 кВ, розташованого на території промислового майданчика Чорнобильської АЕС.

Резервними джерелами електропостачання НБК, що забезпечують електропостачання споживачів особливої групи надійності, є дизель-генераторні установки: дизель-генератор потужністю 1350 кВт · А та дизель-генератор потужністю 730 кВт · А.

---

---

За умови втрати джерела живлення для споживачів, які допускають перерву в електроживленні на 15 с або більше і потребують енергопостачання за будь-яких початкових подій, зокрема у разі втрати зовнішнього енергопостачання, такі споживачі отримуватимуть живлення від дизель-генератора потужністю 1350 кВт · А.

За умови втрати джерела живлення для споживачів, які не допускають перерву в електроживленні більш як 20 мс і потребують енергопостачання за будь-яких початкових подій, зокрема в разі втрати зовнішнього енергопостачання, такі споживачі отримуватимуть живлення від джерел безперебійного живлення, що забезпечують безперервний режим роботи протягом 90 хв.

**Система протипожежного захисту.** Складається із системи пожежної сигналізації; системи оповіщення про пожежу та управління евакуацією; системи пожежогасіння; системи протипожежного водопостачання.

*Система пожежної сигналізації* (СПС) забезпечує раннє виявлення пожежі та подачу сигналу про виникнення пожежі на приймально-контрольний пожежний прилад, встановлений на центральному пульті управління (ЦПУ) системи протипожежного захисту.

*Система оповіщення про пожежу та управління евакуацією*, встановлена у будівлях і спорудах НБК, має звукові засоби оповіщення і світлові покажчики «Вихід». Працює в режимі дистанційного управління з ЦПУ системи протипожежного захисту. Для сповіщення використовується інформація, отримана від СПС.

У НБК передбачені *системи пінного, газового і порошкового пожежогасіння*. Захисту системою пінного пожежогасіння підлягає покрівля машинного залу. Піногенератори встановлені на вежах, що розташовані вздовж машинного залу (рис. 1.34).

Електротехнічні приміщення та приміщення з наявним електронним обладнанням у технологічній будівлі, будівлі електротехнічних пристроїв і ШДПП, а також дизель-генератори обладнані автоматичними системами газового пожежогасіння (рис. 1.35), приміщення ЦЩКУ — системою газового пожежогасіння з ручним пуском, а приміщення дизельного насоса в насосній станції протипожежного водопостачання — автоматичною системою порошкового пожежогасіння.

Для забезпечення пожежної безпеки під час експлуатації СОК у зоні розташування технологічних майданчиків і гаражів, а також у приміщеннях технологічної будівлі передбачено наявність порошкових вогнегасників.

**Система протипожежного водопостачання.** Складається із системи зовнішнього протипожежного водопостачання та системи внутрішнього протипожежного водопостачання. Для пожежогасіння будівель і споруд НБК є протипожежний водопровід високого тиску.

Система протипожежного водопостачання забезпечує зберігання об'єму води для пожежогасіння в пожежних резервуарах (два резервуари місткістю 1500 м<sup>3</sup> кожен); забір води для пожежогасіння пожежними насосами; подачу води для цілей пожежогасіння.



Рис. 1.34 — Система пінного пожежогасіння



Рис. 1.35 — Автоматизована система газового пожежогасіння

---

---

**Система поводження з РАВ** складається із систем поводження з РРВ та ТРВ.

*Система поводження з РРВ* призначена для збору радіоактивно забруднених стоків води з робочих майданчиків/ділянок усередині арки і технологічної будівлі. Забезпечує збір, контроль РРВ і передачу їх у систему поводження з РРВ Чорнобильської АЕС.

Всі джерела утворення РРВ мають систему спеціальної каналізації для збору, накопичення й передавання на попереднє очищення РРВ, що утворюються в процесі експлуатації об'єктів, споруд інфраструктури НБК, ділянок і установок поводження з РАВ.

До системи поводження з РРВ НБК входять система безнапірної спеціальної каналізації; система напірної спеціальної каналізації; система збору та відправки стічних вод санітарного шлюзу.

*Система поводження з ТРВ* виконує збір ТРВ; сортування ТРВ за фізичними, хімічними та радіаційними характеристиками; фрагментацію ТРВ до розміру, зручного для транспортування або навантаження в контейнер; заповнення ТРВ контейнера місткістю 1,3 м<sup>3</sup>; характеристикацію вмісту упаковки; контроль радіаційних характеристик контейнера з ТРВ (поверхнєве забруднення і потужність дози); оформлення документів для перевезення на установки поводження з ТРВ Чорнобильської АЕС; буферне зберігання РАВ для організації перевезення.

Система забезпечується обладнанням для збору, фрагментації, характеристикації, контейнеризації та транспортування ТРВ усередині НБК.

**Система дезактивації**, передбачена проектом НБК, охоплює дезактивацію ЗІЗ; стін і підлог приміщень технологічного будівлі; ділянок простору під аркою, де можливе їхнє забруднення радіоактивними речовинами; внутрішньої оболонки арочної конструкції; СОК; кранів технологічної будівлі; контейнерів і автотранспортних засобів; обладнання і трубопроводів системи поводження з РРВ.

Для проведення дезактивації є спеціальні приміщення: приміщення дезактивації в технологічній будівлі, гаражі СОК, приміщення дезактивації ЗІЗ.

**Система пилопригнічення** (СПП) охоплює майданчик для розміщення мобільної СПП; ділянку приготування розчинів для пилопригнічення; трубопровід подачі розчинів для пилопригнічення до майданчика мобільної СПП. У майбутньому передбачається створення мобільної СПП, що переміщатиметься за допомогою СОК.

**Система водопостачання і каналізації**. Джерелами постачання холодною та гарячою водою НБК є системи господарсько-питного водопостачання і тепlopостачання Чорнобильської АЕС. Резервне джерело гарячого водопостачання — електро-водонагрівачі.

Проектом НБК передбачені виробнича, злизова і господарсько-побутова каналізації.

*Система виробничої каналізації* забезпечує відведення й очищення виробничих стоків. Скидання стічних вод виробничої каналізації після очищення і радіаційного контролю передбачено в зовнішню мережу злизової каналізації.



---

---

*Система зливової каналізації* призначена збирати атмосферні опади з поверхні арки, покрівель технологічної будівлі і будівлі електротехнічних пристроїв, а також з покрівлі, що виступає за межі арки. Для збору зливових вод, снігу/льоду з покрівлі арки влаштовано північний і південний басейни. Опади збираються в колектор збору зливових вод НБК і скидаються в підвідний канал системи гідротехнічних споруд Чорнобильської АЕС. Крім того, система зливової каналізації збирає атмосферні опади з території, прилеглої до арки. Скидання опадів передбачено в колектор збору зливових вод НБК.

*Система господарсько-побутової каналізації* забезпечує відведення господарсько-побутових стоків НБК у мережу господарсько-побутової каналізації Чорнобильської АЕС.

**Система стисненого повітря.** Складається з мережі подачі стисненого повітря для технологічних та ремонтних потреб і мережі подачі стисненого повітря до пневматичних приводів системи вентиляції. Для подачі стисненого повітря встановлено чотири компресори з вбудованими ресиверами і блоками осушення.

**Система освітлення НБК.** Передбачає робоче і аварійне освітлення. Простір під аркою освітлюється трьома прожекторними вежами 30 м заввишки, майданчик тимчасового складування — додатково встановленими на покрівлі технологічної будівлі прожекторами. Конструкції основних кранів обладнані освітлювальними приладами, які вмикаються під час роботи кранів. Для освітлення території НБК використовуються світильники, встановлені на залізобетонних опорах 10 м заввишки і на трьох сталевих щоглах 30 м заввишки.

Для світлоогородження НБК застосовують загороджувальні вогні.

**Система блискавкозахисту.** Складається з блискавкоприймачів, струмовідводів і контуру заземлення. Захищає персонал, обладнання, будівлі та споруди НБК від впливу блискавки.

**Система промислового телебачення** уможливорює дистанційне управління механізмами і візуальний контроль основних технологічних процесів. Використовується також для спостереження за персоналом, який бере участь в операціях, безпосередньо пов'язаних з технологічним процесом.

## **1.7 Введення в експлуатацію нового безпечного конфайнмента**

Кабінет Міністрів України постановою від 26 квітня 2017 року № 305 затвердив Порядок прийняття в експлуатацію нового безпечного конфайнмента, визначивши особливості процедури прийняття в експлуатацію цього об'єкта з урахуванням усіх окремих проєктів будівництва, що входять до складу цілісного майнового комплексу об'єкта.

Згідно з постановою, прийняття в експлуатацію об'єкта здійснюється отриманням сертифіката на весь об'єкт будівництва. Датою прийняття в експлуатацію цілісного майнового комплексу об'єкта є дата видачі сертифіката на нього.

---

---

Після встановлення арки у проектне положення наприкінці листопада 2016 року, паралельно з виконанням робіт із закінчення будівництва НБК, розпочалися індивідуальні випробування окремих систем та обладнання НБК (рис. 1.36—1.39).

У серпні 2018 року Чорнобильська АЕС отримала сертифікат Державної архітектурно-будівельної інспекції України, що засвідчує відповідність закінченого будівництвом об'єкта НБК [16]. Сертифікат підтвердив факт виконання робіт у повному обсязі згідно з проектною документацією та відкрив дорогу до кінцевого етапу — прийняття в експлуатацію НБК як цілісного майнового комплексу разом із внутрішніми системами.

На початку 2019 року відбулися комплексні випробування СРК НБК (рис. 1.37), системи електропостачання НБК за сценарієм повного знеструмлення і системи протипожежного захисту (рис. 1.38) [16]. Під час випробувань симулювали аварійні ситуації та перевіряли реакцію на них окремих систем.

Для закінчення інших випробувань деякі технологічні системи, зокрема системи електропостачання, освітлення, зв'язку та оповіщення, протипожежного захисту, опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, СРК, ІСУ, залишалися в експлуатаційному режимі.

Випробування СОК після її модифікації проводилися 18—22 лютого 2019 року (рис. 1.39) [16]. Раніше перевірки виявили проблему перевищення обертового моменту електродвигунів на приводах мостів СОК. Після усунення причин компанії-виробник кранів реалізувала низку заходів, пов'язаних як з механічною частиною СОК, так і з системою управління нею.

Під час випробувань перевіряли роботу СОК у разі максимального завантаження (100 т на міст), рух кожного з мостів з одним вимкненим двигуном, роботу системи позиціонування мостів, а також пересували мости по всій довжині підкранових шляхів (від західної стіни до простору над об'єктом «Укриття»).

Випробування показали позитивний вплив модифікації СОК і потребу в доопрацюванні деяких функцій у системі контролю та управління СОК, у закінченні випробувань системи позиціонування мостів та налаштуванні окремих механічних компонентів.

22 квітня 2019 року НБК було переведено у режим пробної експлуатації [16]. Завдання пробної експлуатації — переконатися, що все обладнання та устаткування виконує свої функції. Під час пробної експлуатації практично все обладнання і системи НБК працювали у проектному режимі протягом 72 годин.

Крім цього, робота в такому режимі дала змогу перевірити рівень кваліфікації, отриманий персоналом Чорнобильської АЕС при навчанні. На першому етапі пробної експлуатації проводилося тренування з СОК: переміщення візків з мостових кранів у гаражі технічного обслуговування. На другому етапі інспектувалися підкранові балки СОК і пройшло тренування з переміщенням двох кранів (західного і східного)



Рис. 1.36 — Випробування мостового крана в технологічній будівлі



Рис. 1.37 — Випробування системи радіаційного контролю



Рис. 1.38 — Випробування системи пінного пожежогасіння



Рис. 1.39 — Випробування системи основних кранів після модифікації

---

---

над дахом об'єкта «Укриття». Після цього провели симуляцію демонтажу, підйому і переміщення на майданчик тимчасового зберігання металевої ферми, встановленої під час проведення заходів зі стабілізації об'єкта «Укриття».

Після закінчення будівельно-монтажних робіт зі створення НБК та успішного проведення випробувань, 10 липня 2019 року на засіданні Асамблеї країн-донорів на Чорнобильській АЕС було підписано акт здачі-прийняття НБК від Підрядника (компанії «НОВАРКА») Замовнику (ДСП «Чорнобильська АЕС») [16].

У вересні 2019 року Чорнобильська АЕС отримала сертифікат Державної архітектурно-будівельної інспекції України, який засвідчив, що закінчений будівництвом об'єкт НБК з технологічними системами життєзабезпечення та інфраструктурою відповідає проектній документації і готовий до експлуатації [5], всі роботи виконано згідно з державними будівельними нормами, стандартами і правилами, обладнання встановлено відповідно до актів про його прийняття після випробування згідно із затвердженим порядком.

27 вересня 2019 року відбулося підписання «Акту готовності до експлуатації НБК» [16]. Підрозділи Чорнобильської АЕС було повністю укомплектовано експлуатаційним та ремонтним персоналом НБК, який пройшов теоретичне і практичне навчання та допущений до самостійної роботи.

24 липня 2020 року Державна інспекція ядерного регулювання України видала окремий дозвіл на здійснення дослідно-промислової експлуатації пускового комплексу НБК [16]. Термін дії окремого дозволу — з 24 липня 2020 року до введення в експлуатацію комплексу НБК і об'єкта «Укриття» (видачі ліцензій на переробку, зберігання РАВ, що існують та утворюються під час перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему), в рамках експлуатації НБК разом з об'єктом «Укриття».



---

## ***Розділ 2. ЯДЕРНА БЕЗПЕКА***

В результаті аварії на четвертому енергоблоці Чорнобильської АЕС (рис. 2.1, а) було повністю зруйновано активну зону реактора і всі бар'єри безпеки, які виконували функцію локалізації витоку радіоактивності. Близько 190 т опроміненого ядерного палива у різних модифікаціях розповсюдилось по зруйнованих приміщеннях [1]. Це і фрагменти активної зони у вигляді уламків твелів, графітова кладка, радіоактивні аерозолі (РА), пил і, що найнебезпечніше, утворені скупчення лавоподібних паливовмісних матеріалів (ЛПВМ), зокрема таких, які за певних умов можуть стати потенційно ядерно небезпечними.

Через негерметичність збудованої над зруйнованим четвертим енергоблоком (рис. 2.1, б) захисної споруди — об'єкта «Укриття» — всередину стали потрапляти атмосферні опади. Внаслідок взаємодії води з радіоактивно забрудненими конструкціями, особливо з ЛПВМ, утворилася значна (до 4000 м<sup>3</sup>) кількість високоактивної радіоактивної води, яка накопичувалась на різних «поверхах» зруйнованого енергоблока.

Протягом 30 років об'єкт «Укриття» значною мірою локалізував негативний вплив на довкілля радіоактивних матеріалів, які в ньому містились [5]. Аналіз процесів, що відбувалися в об'єкті «Укриття» впродовж цих років, виявив основні чинники, які впливають на ядерну та радіаційну безпеку:

- лавоподібні паливовмісні матеріали, які утворилися під час руйнування активної зони реактора;

- радіоактивні аерозолі (пил), зокрема високодисперсні, що містять трансуранові  $\alpha$ -випромінювачі внаслідок руйнування ЛПВМ та інших радіоактивних матеріалів;

- радіоактивна вода як наслідок взаємодії вологи з ЛПВМ та радіоактивними матеріалами.

Після побудови та введення в експлуатацію НБК (рис. 2.1, в) з'явилась нова єдина система, в якій, через зміну волого-температурного режиму, змінилися процеси, що раніше відбувалися в об'єкті «Укриття», причому як у позитивному, так і в негативному аспектах:

- якщо до побудови НБК потенційно ядерно небезпечні скупчення ЛПВМ були у перезволоженому та підкритичному стані, то зараз можуть стати ядерно небезпечними через втрату вологи і початок процесу зворотної критичності;



Рис. 2.1 — Трансформація четвертого енергоблока Чорнобильської АЕС від аварії до створення нового безпечного конфайнмента:

- а — зруйнований четвертий енергоблок Чорнобильської АЕС (1986);  
б — захисна споруда — об'єкт «Укриття» (2006); в — НБК (2017)

---

---

до побудови НБК, через потрапляння вологи в об'єкт «Укриття», утворювалась значна кількість радіоактивної води, що погіршувало стан радіаційної безпеки через потребу постійного видалення та переробки радіоактивної води на системах поводження з рідкими РАВ Чорнобильської АЕС. Із побудовою НБК ці ризики зникли, але натомість після висихання скупчень радіоактивної води і оголення високоактивних донних відкладень виникла загроза утворення додаткових джерел радіоактивного пилу;

до побудови НБК радіоактивні аерозолі, що утворювались усередині об'єкта «Укриття», через нещільності та вентиляційну трубу викидались у довкілля, значно погіршуючи радіаційний стан. Після побудови НБК цей ризик зник, а НБК став надійним захисним бар'єром витоку РА. Однак втрата вологи і підвищення температури всередині об'єкта «Укриття» може прискорити процес утворення РА через деструкцію радіоактивно забруднених бетонних конструкцій, що призведе до збільшення РА всередині НБК.

## **2.1 Паливовмісні матеріали об'єкта «Укриття»**

Основним джерелом надходження радіонуклідів у довкілля і найсерйознішим джерелом радіологічної небезпеки є ЛПВМ, що містять опромінене паливо. ЛПВМ безупинно піддаються як впливу коливань температури та вологості, так і істотному радіаційному впливу, тому що містять напрацьовані продукти поділу та активації — трансуранові ізотопи, зокрема плутоній і америцій. З часом відбувається їх деградація — зміна механічних властивостей у вигляді помітного зниження міцнісних характеристик. Зменшення міцності ЛПВМ зумовлено наявністю в матеріалі макротріщин і відбувається через накопичення мікродефектів структури — радіаційних ушкоджень в об'ємі ЛПВМ внаслідок  $\alpha$ -розпаду компонентів опроміненого палива.

Аналізуючи дані досліджень за минулі 35 років, можна констатувати, що й на сьогодні нема єдиної думки стосовно точного опису процесів виникнення та формування ЛПВМ [17—23]. Водночас треба визнати, що основним процесом утворення лав був процес високотемпературної взаємодії силікатів з оболонками твелів і окисленим паливом [24].

Перед аварією в приміщеннях реакторного відділення четвертого енергоблока ядерне паливо містилося в активній зоні реактора РБМК-1000, в басейні витримки касет з відпрацьованим паливом, на вузлі підготовки паливних касет у центральному залі, в приміщенні підготовки свіжого палива. На момент аварії активна зона реактора мала 1659 тепловидільних касет, один додатковий поглинач і один незавантажений канал. Велика частина тепловидільних касет являла собою касети, які з самого початку кампанії мали вигорання 11—13 МВт добу/кг (U). Загальна кількість

ядерного палива на четвертому енергоблоці (разом з ядерним паливом у шахті реактора) перед аварією 1986 року становила 214,6 т [25].

Склад і кількість матеріалів, які містились у шахті реактора (прим. 504/2) і під-апаратному прим. 305/2 та брали участь у формуванні ЛПВМ, наведено в табл. 2.1, а співвідношення матеріалів, що увійшли до складу ЛПВМ, — на рис. 2.2 [26].

**Таблиця 2.1 — Склад та кількість матеріалів, які брали участь у формуванні лавоподібних паливовмісних матеріалів**

Матеріал	Містилось у прим. 504/2 і 305/2, т	Увійшло до складу ЛПВМ, т
Паливо (U)	120	90
Сталь	1300	< 20
Серпентинітова суміш	580	160
Бетон підреакторної плити	130	130
Бетон будівельних конструкцій з верхніх позначок	950	480
Матеріали шахтної засипки	300	280
Цирконій	70	45
Графіт	750	Практично немає

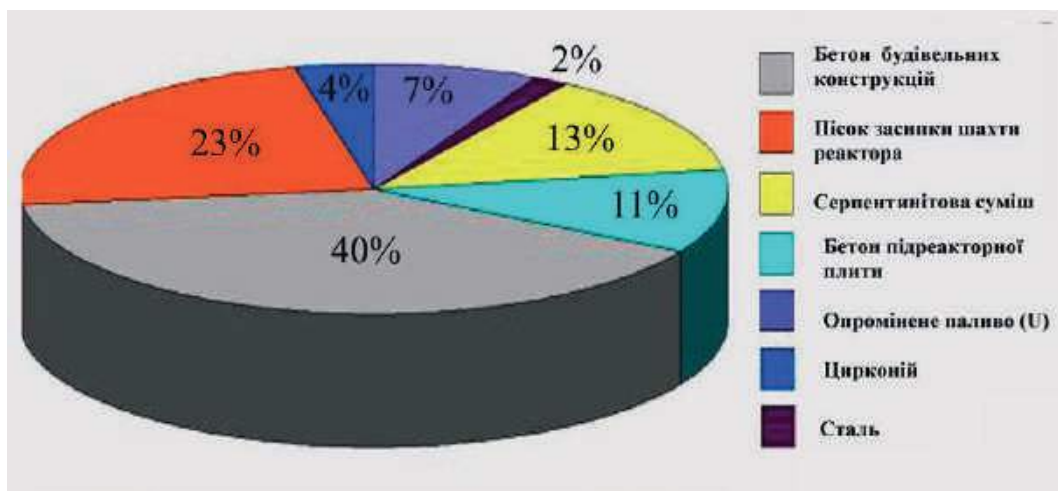


Рис. 2.2 — Співвідношення матеріалів, що увійшли до складу ЛПВМ



Лавоподібні паливовмісні матеріали утворились у прим. 305/2 через залишкове тепловиділення та екзотермічні процеси (горіння графіту, пароцирконієва реакція) в широкому діапазоні температури — від 1100 °С і, можливо, до температури плавлення зерен  $\text{UO}_2$  (близько 2800 °С) [24]. Можна вважати встановленим, що більша частина лавоподібних паливовмісних матеріалів сформувалася в результаті доменного процесу в прим. 305/2. Новоутворена лава розтікалася по сусідніх приміщеннях, коридорах, кабельних проходках та інших вільних каналах, утворивши локальні скупчення ЛПВМ (рис. 2.3). Розплав потрапив до нижніх приміщень: паророзподільного коридору (ПРК) і двох поверхів басейну-барботера (ББ-1 і ББ-2) [17].

Підсумовуючи дані за минулі 35 років, можна дати оцінку кількості палива в приміщеннях об'єкта «Укриття» та його активності станом на 2020 рік. На момент аварії маса палива, завантаженого в активну зону, становила 190,2 т. Маса палива, що залишилася в об'єкті «Укриття», за даними досліджень викиду радіоактивності з об'єкта, становить не менш як 95 % початкового завантаження реактора — близько 180 т [27].

Вміст урану в лавах:

Приміщення	304/3	217/2	210/7	210/6
Кількість проб	34	27	17	10
Середній вміст U, %	4,1	4,9	8,8	6,2
Максимальний вміст U, %	8,1	8,8	10,6	7,2

Густину ЛПВМ [28, 29] значною мірою визначають газові порожнини [17]:

Приміщення	Густина ЛПВМ, г/см <sup>3</sup>
ПРК і 217/2 (чорні ЛПВМ)	$2,69 \pm 0,17$
ПРК (коричневі ЛПВМ)	$3,00 \pm 0,13$ г/см <sup>3</sup>
ББ (пемза)	0,14...0,18
304/3:	
найменш пористий шар (у нижній частині скупчення, що прилягає до підлоги)	1,8...2,4
центральний шар скупчення	0,9...1,8
верхній шар скупчення (найбільш пористий шар)	0,7...0,9

Уточнюючі дані щодо кількості та розміщення лавоподібних паливовмісних матеріалів у приміщеннях об'єкта «Укриття» наведено в табл. 2.2 [30], дані щодо їх активності на сьогодні — в табл. 2.3.

Сумарна питома активність на 31.12.2020 становить  $1,89 \cdot 10^9$  Бк/г (U).





**Таблиця 2.2 — Уточнюючі дані щодо кількості та розміщення ЛПВМ у приміщеннях об'єкта «Укриття»**

Приміщення	Модифікації ПВМ	Паливо, т (У)
Центральний зал (914/2)	Фрагменти активної зони (ФАЗ), ЛПВМ	< 22
Південний басейн витримки (505/3)	129 касет з відпрацьованим ядерним паливом	14,8
Верхні приміщення, ЦЗ (позначка +24.000)	Паливний пил	≈10
304/3	ЛПВМ	6 ± 2
301/5+301/6+303/3	ЛПВМ	5 ± 2,5
217/2	ЛПВМ	0,4 ± 0,2
Підапаратне прим. 305/2 і 504/2 до позначки 24.000	ФАЗ, ЛПВМ, паливний пил	80 ± 30
ПРК (210/5+210/6+210/7)	ЛПВМ	12 ± 6
ББ-2 (012/14+012/15+012/16)	ЛПВМ	3—12
ББ-1 (012/5+012/6+012/7)	ЛПВМ	1,0 ± 0,5
Паливо під каскадною стіною	ФАЗ, паливний пил	(0,9 ± 0,3)
Радіоактивна вода у всіх приміщеннях	Розчинні солі урану	≈4 · 10 <sup>-3</sup>
Паливо на майданчику об'єкта «Укриття»	ФАЗ, паливний пил	0,75 ± 0,25

**Таблиця 2.3 — Питома активність радіонуклідів, Бк/г (У), базового складу палива на 31.12.2020**

α-випромінювачі		β-випромінювачі		β-γ-випромінювачі	
<sup>238</sup> Pu	5,91E+06	<sup>90</sup> Sr	5,16E+08	<sup>125</sup> Sb	1,32E+04
<sup>239</sup> Pu	5,00E+06	<sup>90</sup> Y	5,16E+08	<sup>134</sup> Cs	7,61E+03
<sup>240</sup> Pu	8,17E+06	<sup>106</sup> Ru	2,62E-01	<sup>137</sup> Cs	6,30E+08
<sup>241</sup> Pu	4,33E+03	<sup>147</sup> Pm	3,94E+05	<sup>144</sup> Ce	8,66E-04
<sup>242</sup> Pu	1,30E+04	<sup>241</sup> Pu	1,81E+08	<sup>154</sup> Eu	4,69E+06
<sup>241</sup> Am	2,59E+07			<sup>155</sup> Eu	4,90E+05
<sup>243</sup> Am	1,95E+03				
<sup>244</sup> Cm	5,83E+05				

---

---

До побудови НБК класифікація скупчень ПВМ у приміщеннях об'єкта «Укриття» з точки зору ядерної безпеки змінювалася залежно від зміни умов, в яких перебували скупчення, і повноти знань про їхні фізико-хімічні властивості та агрегатний стан. Потенційно ядерно небезпечними були визнані центральний зал (ЦЗ), південний басейн витримки відпрацьованого палива в прим. 505/3 і прим. 305/2 [27].

Після побудови НБК і зміни волого-температурного режиму всередині нього та згідно з новими розрахунково-експериментальними дослідженнями виникла потреба в переоцінці рівня ядерної безпеки всіх скупчень ПВМ і новій класифікації скупчень подільних матеріалів (спеціальні матеріали, що розщеплюються, — СМР) в об'єкті «Укриття».

Усі скупчення локалізованих всередині об'єкта «Укриття» подільних матеріалів розподілено на три основні групи.

До першої групи належать скупчення ПВМ, властивості яких достатньо вивчені і які за будь-яких змін умов зберігання їх будуть ядерно безпечними [17, 21, 27, 30, 31]. Загалом це відкрито лежачі скупчення ЛПВМ в приміщеннях об'єкта «Укриття» 304/3, 217/2 («слоняча нога»), в паророзподільних коридорах, охоплюючи прим. 210/6 та 210/7, в прим. 012/13 другого поверху басейну-барботера, в прим. 012/7 першого поверху басейну-барботера.

До другої групи належать приховані скупчення ПВМ, які недостатньо вивчені (через недоступність до них) і за певних умов можуть бути потенційно ядерно небезпечними; питання їх ядерної безпеки має бути вирішене найближчим часом. Для цього треба провести додаткові дослідження.

До третьої групи належать скупчення, які з високою ймовірністю можна віднести до ядерно небезпечних (на них зупинимось окремо в підрозділі 2.2).

**До першої групи** належить *приміщення 304/3*, яке має велику кількість радіоактивного пилу і сліди руйнувань. ЛПВМ займають всю його площу як єдине скупчення шаром 0,6—1 м на підлозі приміщення (рис. 2.4). Поверхня ЛПВМ неоднорідна, чорного кольору, вкрита тріщинами і складається з окремих шматків. Візуально структура ЛПВМ пориста. В застиглій лаві багато великих порожнин, об'єм деяких з них сягає 1—2 дм<sup>3</sup>. ЛПВМ дуже неоднорідні за пористістю. Найменш пористий шар знаходиться знизу скупчення, що прилягає до підлоги і має густину близько 1,8—2,4 г/см<sup>3</sup>. Центральний шар має більшу пористість і меншу густину — приблизно 0,9...1,8 г/см<sup>3</sup>. Верхній, пористий шар, має густину коло 0,7—0,9 г/см<sup>3</sup>. Об'єм ЛПВМ становить 50—70 м<sup>3</sup>, маса палива —  $6 \pm 2$  т (U).

До одного з під реакторних *приміщень 217/2* ЛПВМ протекли з прим. 301/6 через проходки в перекритті. Ще восени 1986 року в прим. 217/2 виявили гігантську застиглу масу, що за формою нагадувала скляну краплю та отримала назву «слоняча нога» (рис. 2.5). Потужність експозиційної дози (ПЕД) біля її поверхні досягала 8000 Р/год. Поверхню «слонячої ноги» в 1986—1988 роках можна було описати як чорну оплавлену масу з гладкою блискучою поверхнею. Довжина шляху лави від

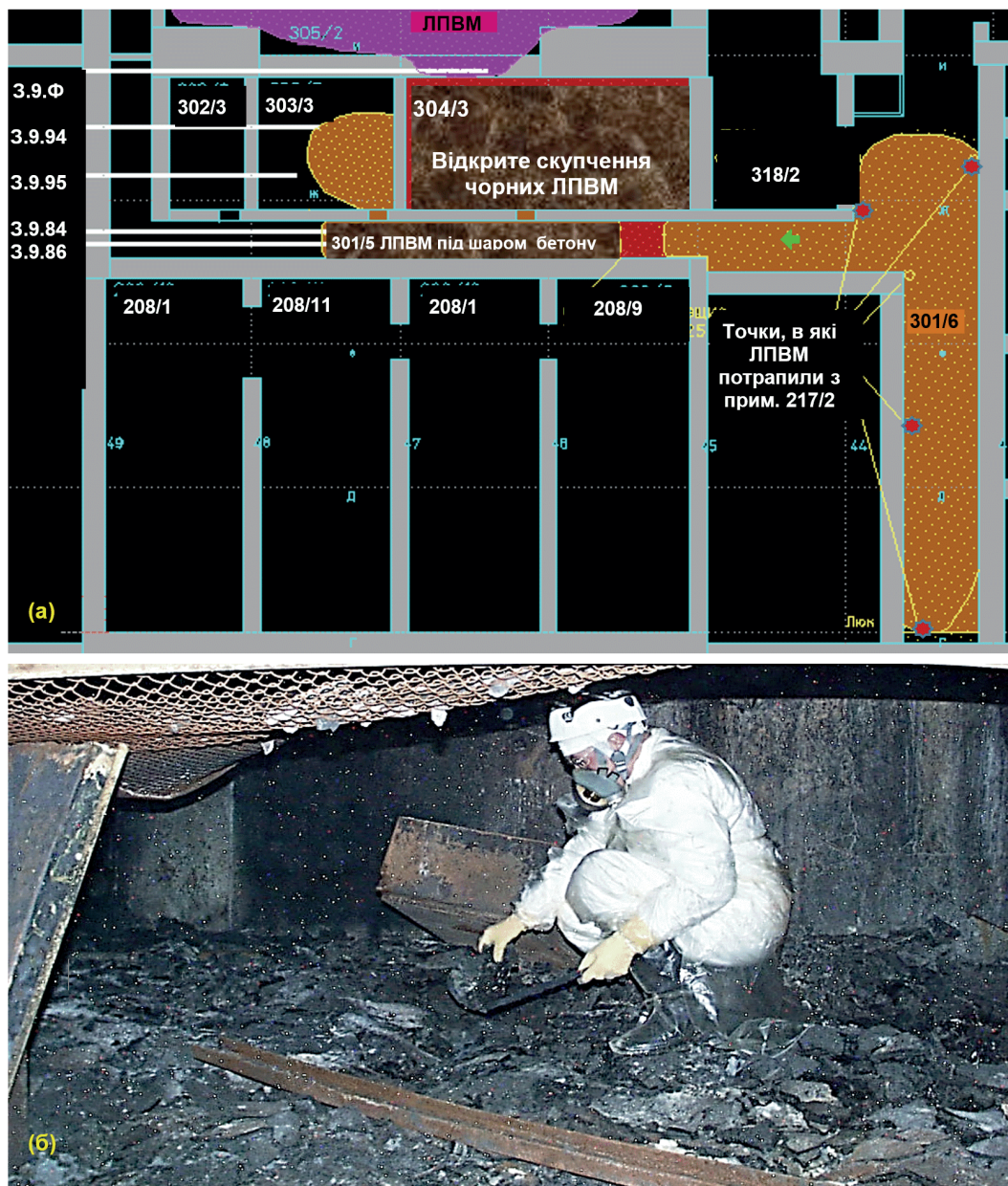


Рис. 2.4 — Приміщення 304/3 об'єкта «Укриття»:  
а — розташування скупчення чорних ЛПВМ [30, 31]; б — відбір проб ЛПВМ



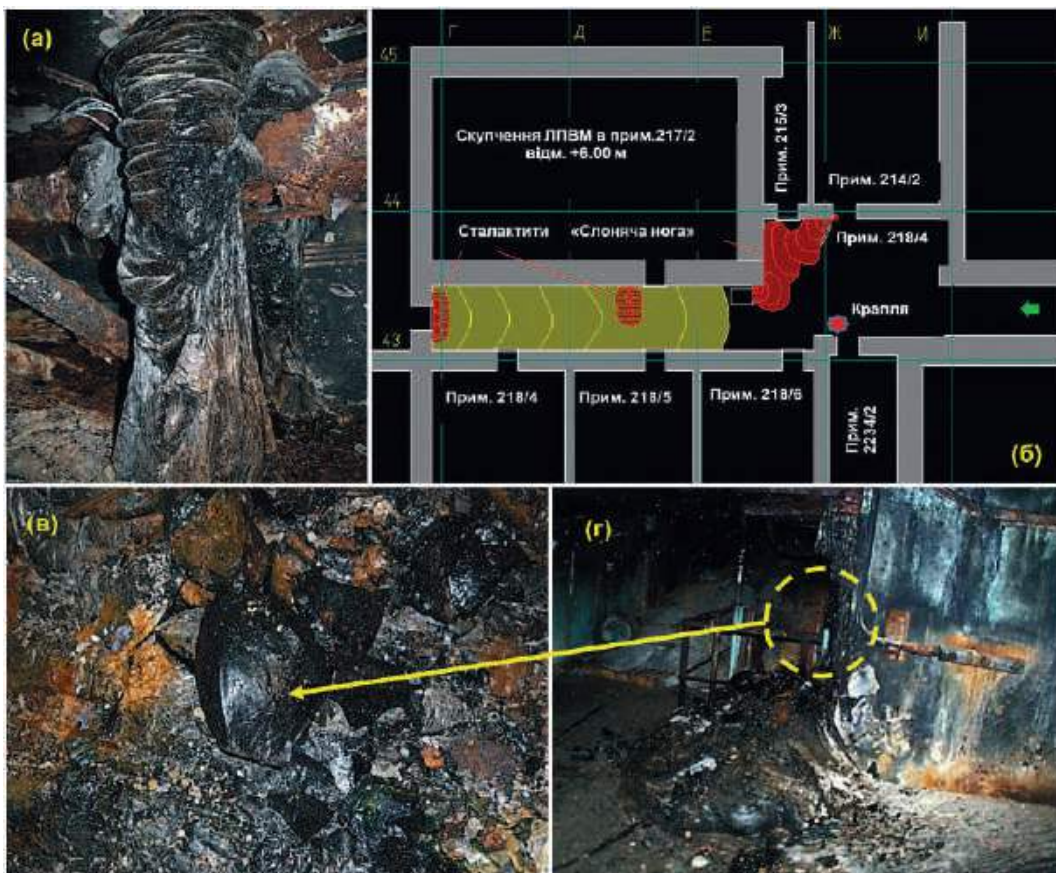


Рис. 2.5 — Приміщення 217/2:

а — «сталактити»; б — розташування скупчення ЛПВМ;  
в — фрагменти руйнування «слонячої ноги»; г — сучасний вигляд ЛПВМ «слоняча нога»  
(фото О. В. Купного)

прим. 305/2 до верхньої частини «слонячої ноги» — 25 м. Блискуча (за результатами обстежень 1986—1988 років) склоподібна поверхня ЛПВМ з часом стала матовою. Поверхня скупчень весь час зазнавала впливу зовнішнього середовища. Згодом на ній з'явилися численні тріщини та об'ємні руйнування. Площа основи «слонячої ноги» — 6...7 м<sup>2</sup>. Основи «сталактитів» приховані під бетоном [32, 33]. Коридор залитий бетоном по обидва боки. Поверхня бетону біля південного торця досягає стелі приміщення. Сумарний об'єм скупчень становить орієнтовно 2—4 м<sup>3</sup>, маса палива — 0,4 ± 0,2 т (U).



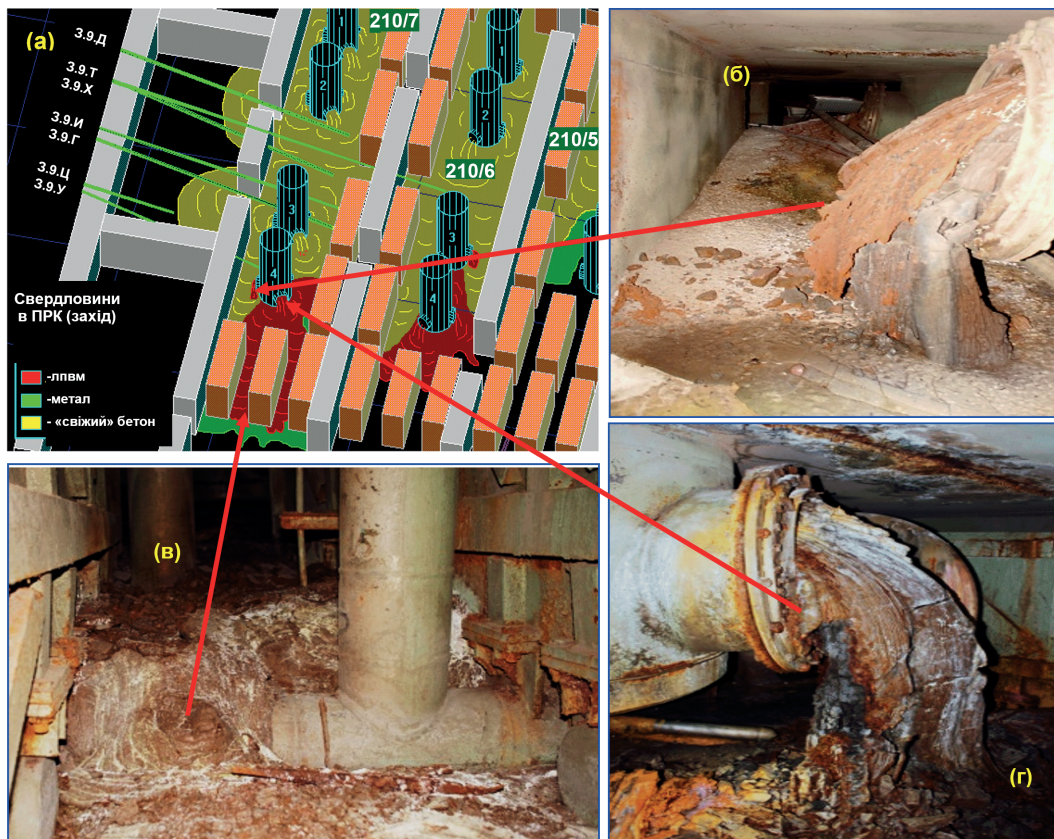


Рис. 2.6 — Приміщення в паророзподільному коридорі:

- а — схема розташування приміщень у паророзподільному коридорі та просторове розташування скупчень ЛПВМ у прим. 210/5, 210/6 і 210/7 [30, 31]; б — скупчення ЛПВМ у четвертому ПСК, перший патрубок; в — ЛПВМ між конденсаторними батареями; г — скупчення ЛПВМ у четвертому ПСК, третій патрубок

В приміщення 210/7 (рис. 2.6) ЛПВМ потрапили через четвертий пароскидний клапан (ПСК) з південно-західної частини прим. 305/2. Через інші три клапани під час ліквідації аварії в 1986 році до приміщення надходив «свіжий» бетон [28]. У першому патрубку четвертого ПСК в прим. 210/7 спостерігається своєрідний застиглий водоскид коричневих ЛПВМ з великими краплями і струменями металу (рис. 2.6, б). Другий патрубок — це застиглий струмінь вугільно-чорних ЛПВМ. Третій патрубок — шоколадно-коричнева застигла маса (рис. 2.6, г). Поруч із застиглим струменем ЛПВМ,

навпроти четвертого патрубку, впритул до конденсаторної батареї, з шару ЛПВМ виступає застиглий метал.

Товщина шару ЛПВМ біля західної стіни сягає 0,5 м. Далі в північному напрямку ЛПВМ вкриті «свіжим» бетоном. Безпосередньо під проломом у стіні між прим. 304/3 і прим. 305/2 лава проникла в прим. 210/6 і лежить у розриві сталевго шва металевго облицювання стелі. Об'єм ЛПВМ у прим. 210/7 становить приблизно 13—28 м<sup>3</sup>. Маса палива — коло 3,7...10,4 т (У).

В приміщення 210/6 паророзподільного коридору (рис. 2.7) ЛПВМ потрапили через третій та четвертий ПСК з південно-східної частини прим. 305/2 [28]. Патрубки

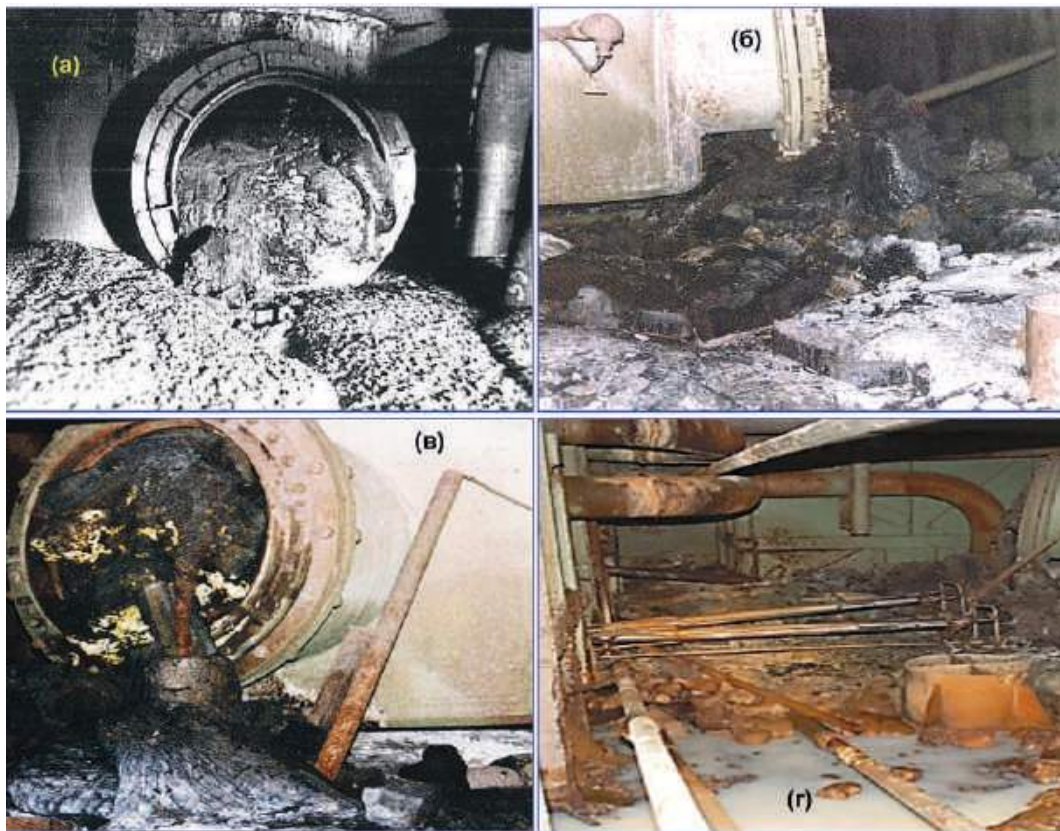


Рис. 2.7 — ЛПВМ у прим. 210 ПРК:

- а — третій ПСК, перший патрубок; б — четвертий ПСК, другий патрубок;  
в — четвертий ПСК, третій патрубок (жовті плями — новоутворення з оксидів урану);  
г — розплав металу у воді

---

---

клапанів заповнені ЛПВМ чорного кольору (рис. 2.7, а, в). У патрубках серед ЛПВМ є безліч дрібних фрагментів металоконструкцій. На поверхні ЛПВМ, що витекли з клапанів, вирізняються яскраво-жовті плями новоутворень солей урану (рис. 2.7, б). Товщина шару відкритих скупчень ЛПВМ у прим. 210/6 дорівнює від 0,1 до 0,6 м [30, 31]. В районі четвертого ПСК зафіксовано переплавлений і застиглий метал (рис. 2.7, г), а матові ЛПВМ пронизані великими газовими порожнинами. ЛПВМ уздовж конденсаторних батарей залиті «свіжим» бетоном, який потрапив сюди під час ліквідації аварії в 1986 році.

Під прим. 210/6 чотири пароскидні труби заповнені ЛПВМ, товщина шару яких становить не менш як 0,35 м. Застиглі маси металу фіксуються візуально, товщина їх не перевищує 0,2 м. ЛПВМ на підлозі приміщення і паророзподільних клапанах переважно чорні. Об'єм ЛПВМ у прим. 210/6 — приблизно  $17...30 \text{ м}^3$ , маса палива — коло  $2,4...6,2 \text{ т (U)}$ .

*Відкрите скупчення ЛПВМ на другому поверсі басейну-барботера ББ-2* (рис. 2.8) розташоване в прим. 012/15. За своєю структурою скупчення являє собою систему пов'язаних один з одним гребенів з провалами 0,1—0,3 м завглибшки, і ця система по краях вкрита шаром бетону, який заливали 1986 року. З північного боку рівень бетону досягає близько 0,8 м. Відкрита поверхня місцями покрита склоподібною кіркою, місцями — пемзоподібною. Усередині ЛПВМ містяться гранули коричневих ЛПВМ [29, 30, 31]. ЛПВМ підіймаються над рівнем підлоги до 1,2—1,3 м. Ширина основи скупчення — майже 4 м, довжина — 8 м, об'єм —  $23 \pm 6 \text{ м}^3$ . Можливо, під бетонними напливами до 0,9 м є скупчення ЛПВМ або розплаву металу (на це вказують високі значення ПЕД над бетоном) [32, 33].

У прим. 012/13 розташована оплавлена металева труба (див. рис. 2.8, г). Металеве облицювання частини стіни (прохід з прим. 012/14 до прим. 012/13) навпроти цієї труби також частково оплавлене. Площа відкритих ЛПВМ у прим. 012/15 — приблизно  $15 \text{ м}^2$ . Загальний об'єм ЛПВМ у ББ-2 — орієнтовно  $50 \text{ м}^3$ . Маса палива в ББ-2 може досягати 12 т (U).

*ЛПВМ на першому поверсі басейну-барботера ББ-1* (рис. 2.9) потрапили з пароскидної труби (див. рис. 2.9, б) [28]. Скупчення, вершина якого сягає майже 0,8 м від рівня підлоги, вкрите на 0,2—0,4 м бетоном 1986 року, місцями — склоподібною кіркою, місцями — пемзоподібною. В середині міститься гранульована склоподібна речовина темно-коричневого кольору (коричневі ЛПВМ) [32, 33]. У березні 2000 року частину скупчення покрили шаром радіаційно стійкого кремнійорганічного матеріалу ЕКОР для ізоляції та консервації ЛПВМ і запобігання неконтрольованому розповсюдженню радіонуклідів (див. рис. 2.9, в).

Лавоподібні паливовмісні матеріали у вигляді окремих фрагментів розташовані в різних місцях ББ-1, деякі з них — на горизонтальних ділянках пароскидних труб і металоконструкцій на висоті більше ніж 1 м. У п'яти пароскидних



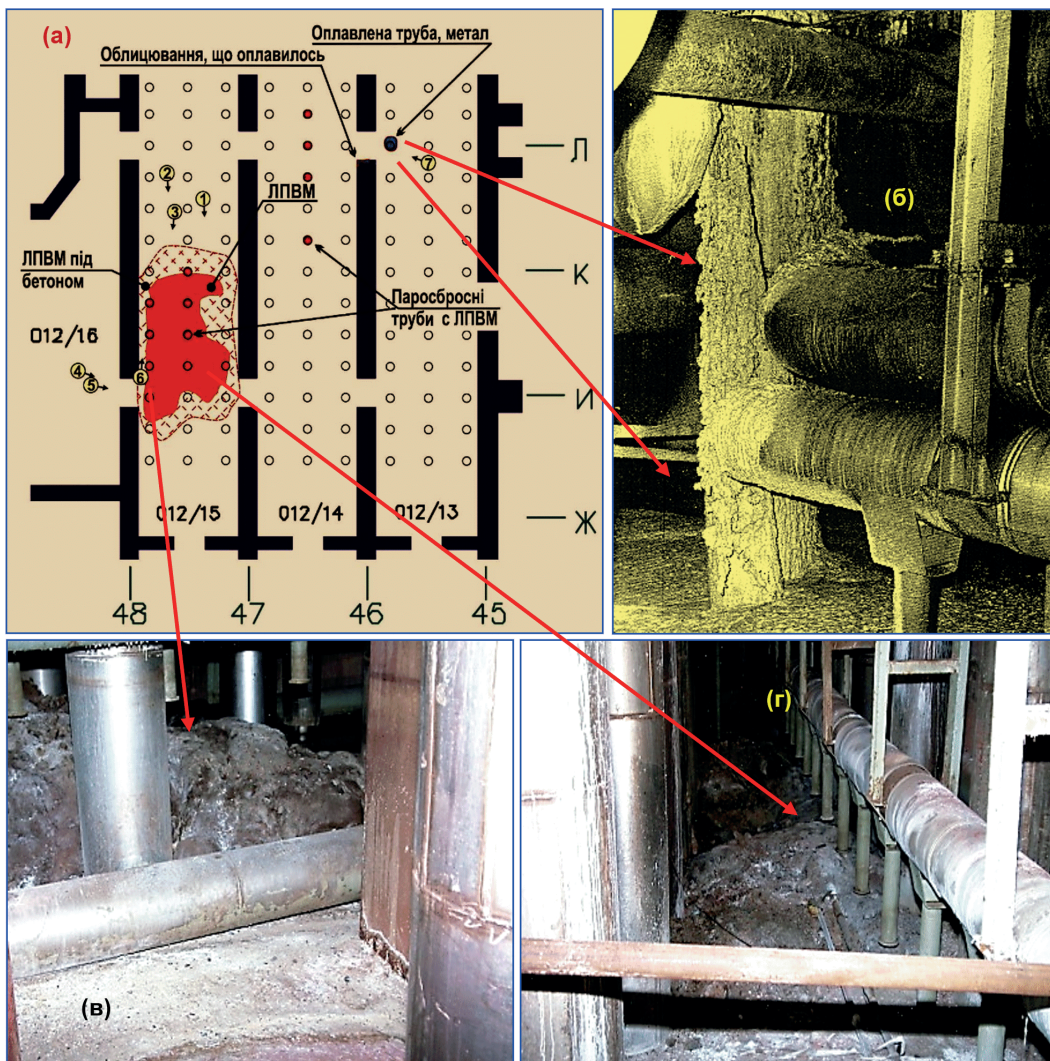


Рис. 2.8 — Схема розташування приміщень у ББ-2:

а — просторове положення скупчення ЛПВМ у приміщенні 012/15;

б, в — фото скупчення ЛПВМ в приміщенні 012/15; г — оплавлена труба.

трубах (діаметром 280 мм) може міститися від 0,06 до 0,3 т ЛПВМ (У) [29]. Під бетонними напливами (до 1 м) розташований фрагмент скупчення ЛПВМ з високим значенням потужності експозиційної дози.

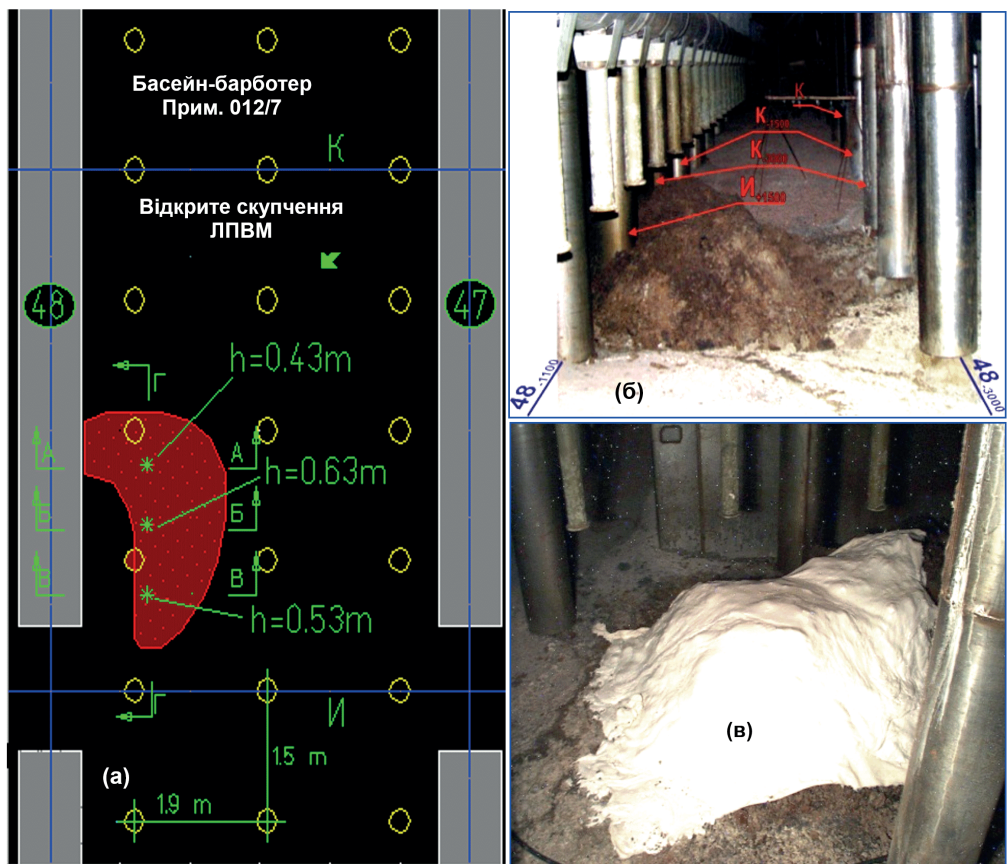


Рис. 2.9 — Схема приміщення 012/7:

*a* — просторове положення скупчення ЛПВМ [30, 31]; *б* — скупчення ЛПВМ (1999);  
*в* — ЛПВМ після покриття ЕКОР (2000)

У прим. 012/5 є оплавлена труба з металевим каплеподібним натіканням. На стелі поблизу оплавленої труби — сліди температурного впливу. Площа відкритих ЛПВМ у прим. 012/7 становить приблизно 3—4 м<sup>2</sup>. Кількість ЛПВМ у приміщеннях ББ-1 можна оцінити в 0,5— 1,5 т (У).

До другої групи належать скупчення ЛПВМ, про гарантії ядерної безпеки яких можна говорити лише після уточнення (за результатами додаткових досліджень) їхніх параметрів [17, 21, 30, 31] і реалізації деяких організаційно-технічних рішень. До таких композицій належать відпрацьоване ядерне паливо в південному басейні витримки (прим. 505/3) і паливовмісні матеріали в центральному залі (прим. 914/2).



У штатному режимі південний басейн витримки (ПБВ) був заповнений водою. На момент аварії в ньому містилося 129 паливних касет — 14,8 т (U) із середнім вигорянням більш як 12,5 МВт [25]. На початку 1990-х років у ПБВ з прим. 515/3 пробурили п'ять свердловин: В-19-103, В-22-80, В-22-90, В-21-96, В-20-100 (рис. 2.10). Оглянувши через них стан тепловидільних збірок (ТВЗ), підвісок і підлоги, а також вимірявши ПЕД, встановили, що кришка над свердловиною зруйнована, до ПБВ із ЦЗ фрагменти активної зони не потрапили, пенали мали штатне положення, води не було.

За даними виконаних розрахунків [34], в наповненому водою басейні витримки ТВЗ залишаються глибоко підкритичними. У разі руйнування підвісок, падіння збірок на дно, компактного розташування їх і затоплення водою система все одно залишається підкритичною ( $K_{\text{ef}} < 0,9$ ) [35]. На основі виконаних розрахунково-дослідних робіт [36] встановлено, що гіпотетична ядерно небезпечна композиція могла утворитися тільки в разі падіння і руйнування збірок з подальшим об'єднанням їх кінцевих частин у компактну структуру.

На цей час моніторинг у ПБВ здійснюють лише двома блоками детектування системи контролю ядерної безпеки, встановленими в свердловини. Аналіз потужності експозиційної дози  $\gamma$ -випромінювання і щільності потоку нейтронів (ЩПН) у свердловинах показав, що ПЕД у верхній частині цього приміщення знизилася з 3500 Р/год у 1990 році до 370 Р/год у 2013-му, а показник ЩПН в нижній частині збільшився, відповідно, із 140 н/(см<sup>2</sup> · с) до 400 н/(см<sup>2</sup> · с). Це свідчить про те, що значна частина ТВЗ, найімовірніше, зруйнувалася і впала на дно приміщення.

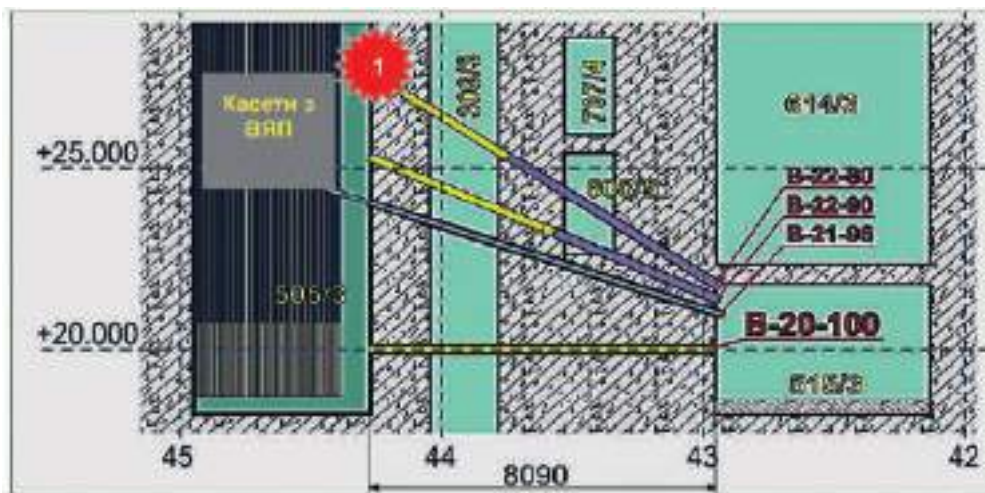


Рис. 2.10 — Південний басейн витримки відпрацьованого ядерного палива;  
1 — можливе місце встановлення відеокамери

Факт відсутності води в ПБВ, стабільної (практично незмінної) динаміки нейтронної активності, а також висока ймовірність падіння збірок дає підставу вважати, що конфігурація ПБМ у цьому приміщенні є ядерно безпечною. Однак у рамках консервативного підходу до забезпечення ядерної безпеки треба провести візуальне обстеження цього приміщення, щоб мати інформацію щодо теперішнього стану ТВЗ. Тільки після цього можна отримати прийнятні гарантії ядерної безпеки.

На момент аварії на вузлу розвішування, розташованому в північно-східній частині ЦЗ, було 48 касет зі «свіжим» паливом. На сьогодні візуально виявлено тільки сім деформованих касет. Решта, ймовірно, знаходиться під завалами. За останніми даними, під завалами в районі схеми «Е» може ще міститися більш як 1 т ПБМ [30]. Велика частина ЦЗ прихована під багатометровим шаром матеріалів засипки, яку здійснили 1986 року з вертольотів (рис. 2.11). Доступ до ПБМ під завалами матеріалів засипки відсутній.

Згідно з розрахунками [36, 37], ядерну небезпеку в ЦЗ могли б становити лише гіпотетичні критичні композиції (уран-графітовий кластер у штатній структурі

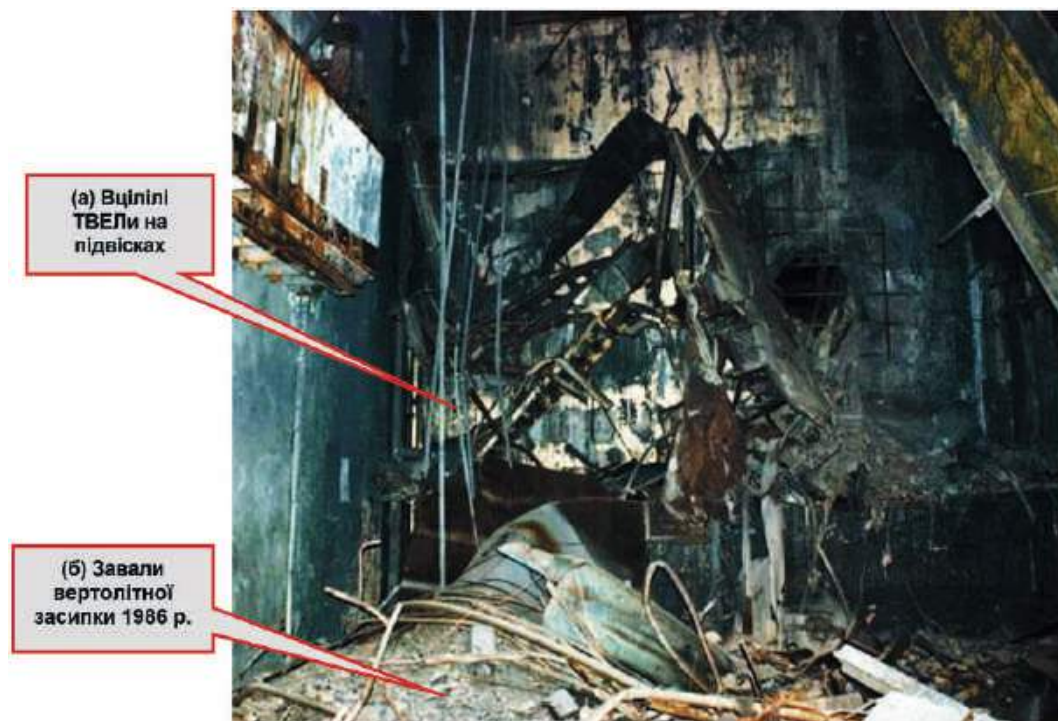


Рис. 2.11 — Завали і свіже паливо в центральному залі об'єкта «Укриття»

активної зони діаметром 5 м і висотою 3,5 м або компактне утворення композиції з підвісок ТВЗ зі свіжим паливом). Поки що за результатами візуальних спостережень існування таких композицій не підтверджено. Швидше за все, основна маса палива в ЦЗ (за винятком ТВЗ на схемі «Е») лежить на підлозі прим. 914/2, під шаром насипу з піску, свинцю і доломіту. Переважна частина ПБМ може бути (рис. 2.12) в найближчих до шахти реактора областях, а також під основним насипом. При цьому зазначимо, що практично вся інформація про стан ПБМ, що містяться в ЦЗ (візуальна інформація, радіаційні поля, дані про щільність потоків нейтронів), отримана тільки «зверху». Водночас області, де передбачається наявність великих скупчень ПБМ, не досліджені.

Нині в ЦЗ відсутній ефективний контроль рівня підкритичності ПБМ і моніторинг нейтронної активності. Незважаючи на те що в матеріалах засипки мали би бути

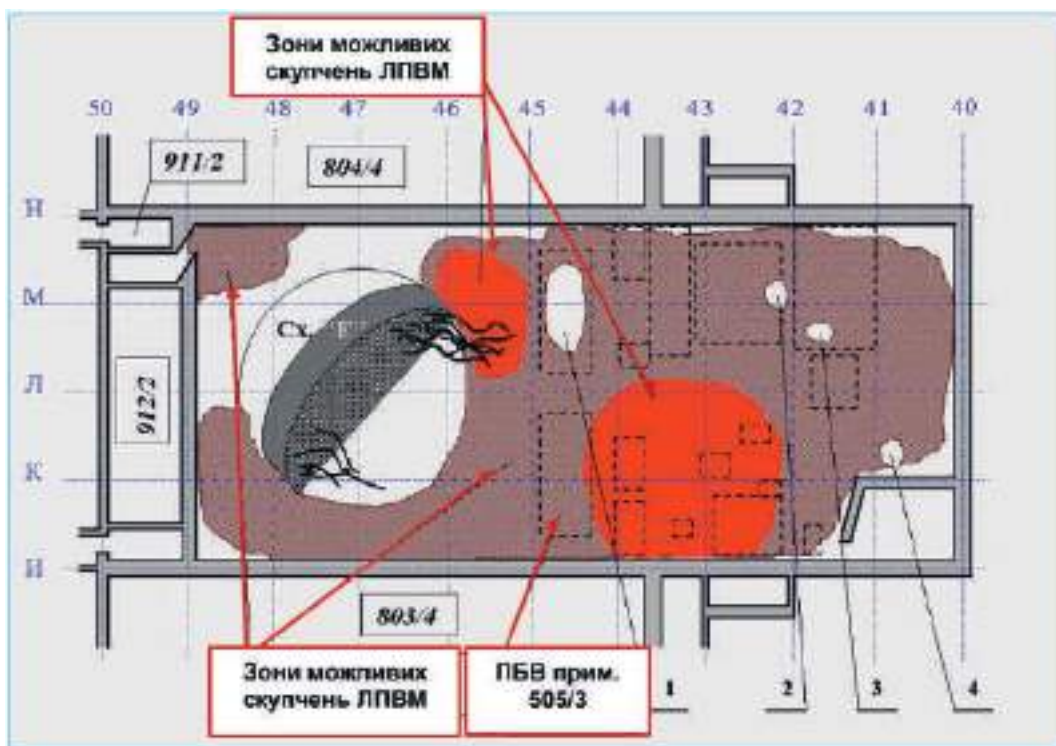


Рис. 2.12 — Розташування зон передбачуваних скупчень ЛПВМ у центральному залі:

1 — прим. 505/4 (ПБВ відпрацьованого палива); 2 — прим. 219/2;

3 — прим. 061/2; 4 — прим. 821/2



---

поглиначі нейтронів (близько 40 т карбіду бору і сполук гадолінію), які періодично скидалися в розвал ЦЗ 1986 року, для забезпечення ядерної безпеки скупчень ПВМ у центральному залі потрібно (до початку демонтажу нестабільних будівельних конструкцій об'єкта «Укриття») провести додаткові експериментально-розрахункові дослідження й організувати хоча б дві-три ефективні точки моніторингу ЩПН.

## 2.2 Ядерно небезпечні скупчення

До третьої групи належать скупчення ПВМ, ядерна безпека яких не гарантована через недостатньо ефективні бар'єри безпеки, моніторинг і контроль рівня підкритичності. Це потенційно найбільш ядерно небезпечні скупчення ЛПВМ у південно-східній частині прим. 305/2, яке було епіцентром взаємодії розплаву активної зони реактора з конструкційними матеріалами.

До цього часу прим. 305/2 так і залишилося недостатньо експериментально дослідженим. Буріння в нього було припинене через високі дозові навантаження і відсутність технології вилучення та поводження з високоактивними кернами. 1990 року сконструйовано дистанційний пристрій (рис. 2.13), який виконав відеозйомку південно-східної частини прим. 305/2.



Рис. 2.13 — Доставка дистанційного пристрою в підапаратне прим. 305/2 [38]

За матеріалами фото- і відеозйомки, кресленнями та схемами, виконаними кількома розвідувальними групами, а також за результатами численних лабораторних досліджень проб вдалося реконструювати загальний вигляд завалу з різних матеріалів, що містяться в прим. 305/2. Для опису ПВМ, що локалізовані тут, останні умовно розбили на 7 підзон (табл. 2.4, рис. 2.14) [39, 26].

**Таблиця 2.4 — Експертні оцінки розподілу паливовмісних матеріалів у прим. 305/2 [26]**

Приміщення	Номер підзони	Коротка характеристика ПВМ в скупченні	Об'єм ПВМ, м <sup>3</sup>	Кількість палива по урану, т
305/2	1	Чорні ЛПВМ, ФАЗ, продукти взаємодії розплаву коріуму з бетоном	150—180	36 ± 12
	2	Коричневі і чорні ЛПВМ, можливо ФАЗ	80—100	25 ± 6
	3	ЛПВМ, шихта, ФАЗ	5—10	3 ± 2
305/2 і 504/2	4	Пухкі ПВМ	40—60	3,5 ± 2
	5	ЛПВМ, шихта, ФАЗ, пухкі ПВМ	70—100	12 ± 7
	6	Сталактит - ЛПВМ	0,7—1,4	0,2 ± 0,1
305/2	7 (нижче позначки +9.7)	ЛПВМ, продукти взаємодії розплаву коріуму з бетоном	Близько 20	Близько 1,5

Підзона 1 — місце утворення основної маси ЛПВМ. У цій частині був і розплавився в активній стадії аварії південно-східний сектор плити опори реактора. Ця частина масиву ЛПВМ характерна, загалом, чорними лавами. Скупчення може містити ділянку з високою концентрацією урану (до 50 %). На дні цієї ділянки ймовірно лежить шар металу. Максимальна кількість палива в скупченні може становити приблизно 50 т.

Підзона 2 — місце утворення коричневих ЛПВМ. Звідси під час активної стадії аварії витікали лави, що сформували згодом великий вертикальний потік. Бетон підреакторної плити зруйнований термічним впливом. Це скупчення містить переважно коричневі ЛПВМ. Максимальна кількість палива в скупченні може досягати 30 т.

Підзона 3 — завал уздовж південної стіни прим. 305/2, що утворився після обвалення металоконструкцій. Передбачуваний тип ПВМ — фрагменти твелів, чорні і коричневі ЛПВМ. Об'єм завалу становить коло 60 м<sup>3</sup>. Орієнтовно в завалі лежить від 1 до 5 т (U) палива — переважно фрагменти твелів.



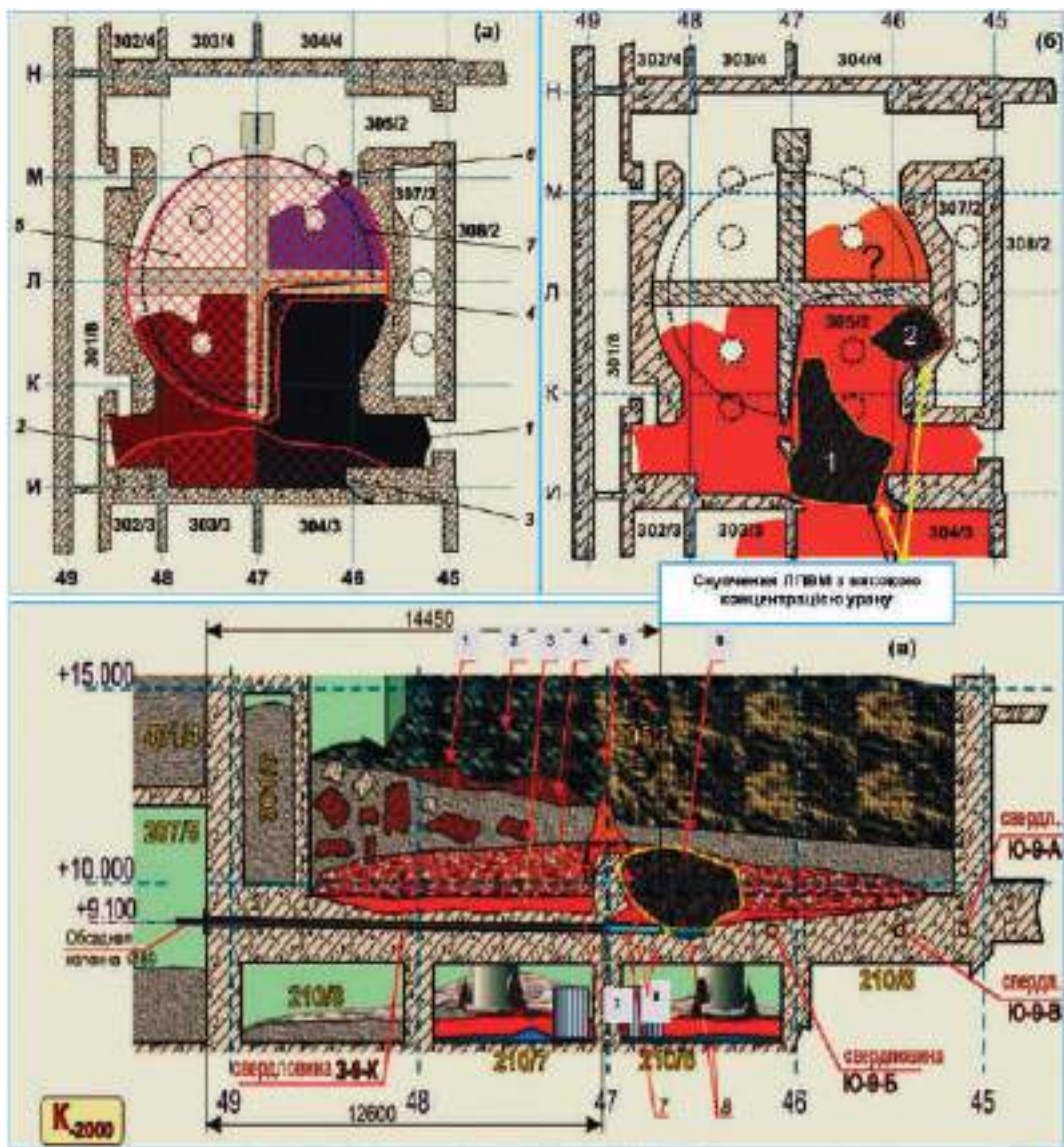


Рис. 2.14 — Розташування гіпотетичних ядерно небезпечних скупчень ЛПВМ у прим. 305/2: а — розташування підзон 1—7 з ЛПВМ; б — ядерно небезпечні зони 1 і 2; в — вертикальний переріз структури скупчень прим. 305/2: 1 — бетон 1986 р.; 2 — завал з ПВМ; 3 — ЛПВМ; 4 — передбачувані межі розповсюдження ЛПВМ; 5 — рихлі ПВМ; 6 — скупчення ЛПВМ з високим вмістом урану; 7 — радіоактивна вода; 8 — радіоактивний метал

Підзона 4 — ПБМ, які утворилися в процесі переплавки південно-східного сектору опори реактора і лавової шихти. Об'єм — 40...60 м<sup>3</sup>. Це скупчення може містити від 1,6 до 5,4 т урану.

Підзона 5 — це скупчення з 50—100 ТВЗ. Маса палива — від 3 до 6 т. Ймовірно, на верхній плиті решти опори реактора в процесі взаємодії фрагментів активної зони (ФАЗ) з конструкційними матеріалами мав утворитися шар ЛПБМ з непереплавленим паливом у ньому. Частина цих ПБМ могла потрапити всередину схеми опори реактора, через що спостерігається візуально термічне пошкодження її верхньої плити. Загальний об'єм ПБМ у скупченні становить 70—100 м<sup>3</sup>, маса палива —  $12 \pm 5$  т.

Підзона 6 — поліхромні ЛПБМ. Це натік ПБМ «сталагміт». Вміст урану в зразках синього кольору — приблизно 5,7 %, у зразках жовтого і коричневого кольору — 7 і 7,6 % відповідно. Сумарний об'єм «сталагміту» — близько 0,7 м<sup>3</sup>. Маса палива в скупченні становить 100—300 кг (U).

Підзона 7 — лавоподібні паливовмісні матеріали з продуктами взаємодії розплаву коріуму з бетоном.

Скупчення переважно чорних і коричневих ЛПБМ (підзони 1 і 2), що утворилися на кінцевій стадії аварії внаслідок тривалого високотемпературного процесу взаємодії розплаву матеріалів активної зони (коріуму) з конструкційними матеріалами (бетоном, серпентинітом, гравієм, металами), фактично являють собою єдиний масив ЛПБМ на підлозі прим. 305/2 (рис. 2.15). Переважно локальний характер дії залишкового тепловиділення палива забезпечив необхідний баланс тепла в зоні формування ЛПБМ.

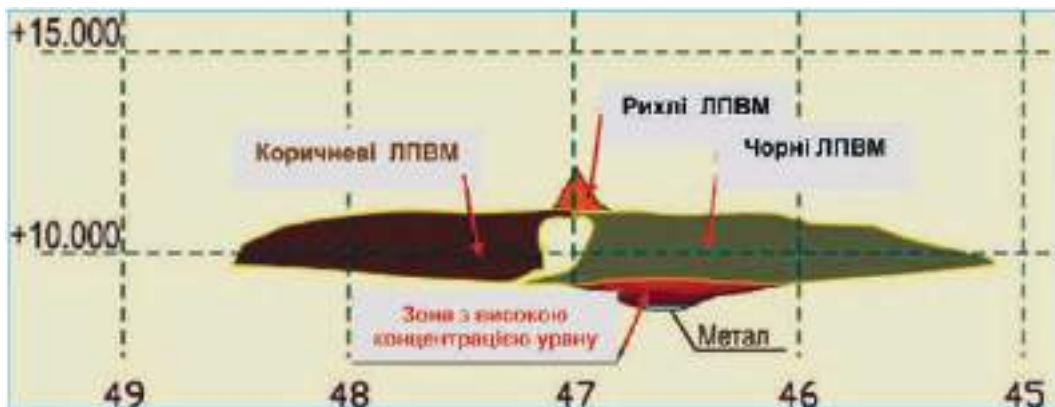


Рис. 2.15 — Схема розташування ЛПБМ з високим вмістом подільних ядерних матеріалів у прим. 305/2 по ряду К-3000 [26]

На температурній картограмі (рис. 2.16) чітко виділяються два епіцентри тепловиділення, що визначають температурний режим навколо двох скупчень подільних матеріалів, локалізованих у зонах проплавлення бетону підреакторної плити. Епіцентр № 1 розташовується у відкритій частині південно-східного квадранта прим. 305/2, навпроти південних відкатних воріт. Епіцентр № 2 — в проміжку між стіною тумби опори бака біологічного захисту та схемою «опори реактора» під тумбою її основи.

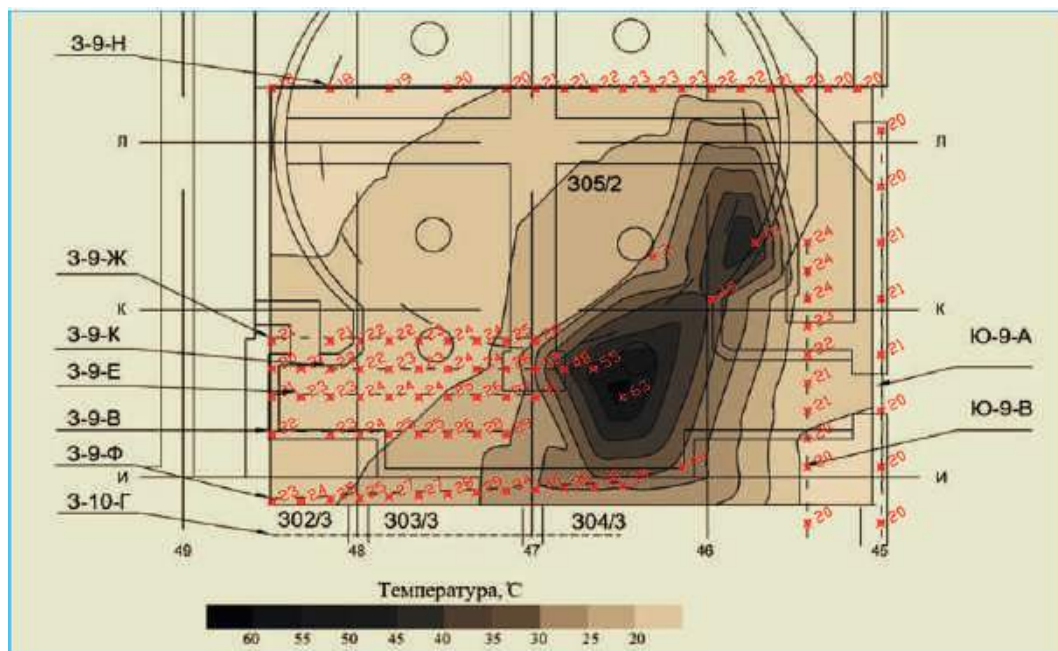


Рис. 2.16 — Картограма температурного поля в підреакторній плиті на позначці +9.10, 2019 рік

Оцінку меж та об'єму двох скупчень з підвищеною концентрацією подільних матеріалів проведено на підставі експериментальних даних температурних, нейтронних  $\gamma$ -полів, відеоспостережень та відбору зразків у 1988—1990 роках (рис. 2.17).

«Південне» скупчення з підвищеною концентрацією подільних матеріалів розташоване в масиві підреакторної плити безпосередньо біля пролому в прим. 304/3 (рис. 2.18). Дані, отримані в процесі дослідження периферії скупчення, показують, що сталева балка (1) аварійної опори схеми «Л» пропалена на рівні 3—4 м від верхньої плити. Це говорить про наявність у цій зоні осередку потужного тепловиділення [40].





Рис. 2.17 — Проведення польових досліджень, 1988—1990 роки:  
а — встановлення датчиків у свердловину; б — візуальні спостереження

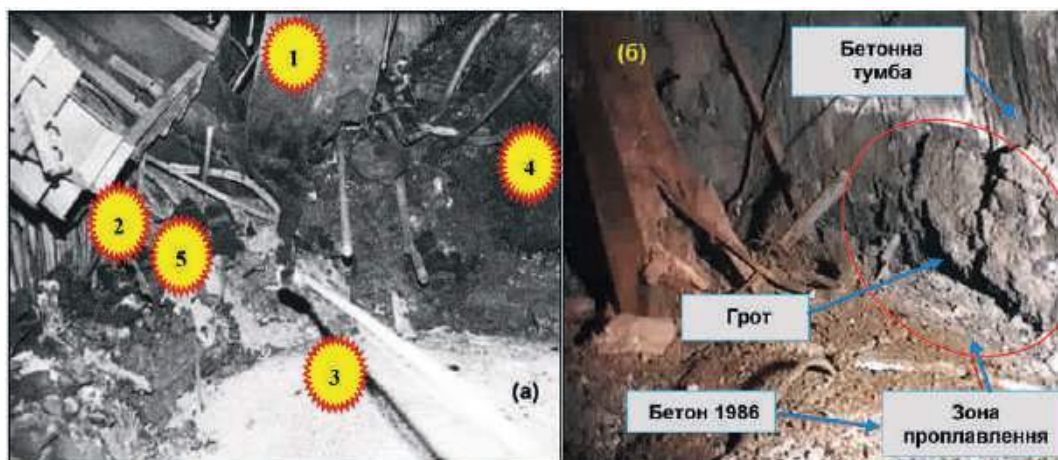


Рис. 2.18 — Результати зовнішнього обстеження зон локалізації скупчень ЛПВМ з підвищеною концентрацією урану в прим. 305/2:  
а — «південне» скупчення ЛПВМ з підвищеною концентрацією подільних матеріалів:  
1 — сталева балка додаткової опори схеми «Л»; 2 — фрагменти нижніх водяних комунікацій; 3 — «свіжий» бетон 1986 року; 4 — пухкі ЛПВМ;  
5 — графітові блоки та фрагменти технологічних каналів;  
б — «північне» скупчення з підвищеною концентрацією подільних матеріалів

---

---

«Північне» скупчення з підвищеною концентрацією подільних матеріалів розташовано в масиві підреакторної плити в безпосередній близькості до пропалу в напрямку прим. 307/2 і в самому пропалі. Воно утворилося в тому місці, де термодинамічні умови по фронту взаємодії розплаву палива з бетоном зумовили наскрізне проплавлення підреакторної плити. Епіцентр цього скупчення лежить у зазорі між стіною тумби опори бака біологічного захисту та схемою опори реактора під тумбою її основи (див. рис. 2.18, б). Візуально виплавлений в напівкруглій бетонній тумбі опори «грот» говорить про наявність джерела тепловиділення під опорою прим. 307/2. На підставі оцінок кількості ядерного палива і аналізу температурних полів показано, що концентрація подільних матеріалів у цій зоні не менша за 30 % [41].

Геометрія та контури ядерно небезпечних скупчень ЛПВМ були оцінені за конфігурацією та координатами свердловин, пробурених у підреакторній плиті (рис. 2.19), з урахуванням результатів аналізу матеріального складу відібраних кернів [42].

Із заходу «південне» скупчення обмежене (буріння було зупинене через високу активність кернів) координатами п'яти свердловин, зі сходу та півночі — проходками свердловин, з півдня — стіною прим. 304/3 і пробуреними в ній свердловинами (див. рис. 2.19). Із наближенням до границі цього скупчення практично в усіх свердловинах спостерігалось різке збільшення ЩПН (до  $1000 \text{ н/см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ). Це підтвердило, що далі вглиб свердловини є потужне джерело нейтронів, яким могло бути тільки скупчення з великою концентрацією подільних матеріалів.

За результатами комплексу розрахунково-експериментальних досліджень показано, що скупчення ЛПВМ у двох зонах проплавлення підреакторної плити можуть мати тришарову структуру: зверху — ЛПВМ, по центру — подільні матеріали високої концентрації, знизу — шар металу (рис. 2.20).

Згідно з виконаними оцінками, загальний об'єм «південного» скупчення з підвищеною концентрацією подільних матеріалів може становити приблизно  $50 \text{ м}^3$ , а об'єм в епіцентрі —  $9 \dots 12 \text{ м}^3$ . Результати оцінок характеристик епіцентру «південного» скупчення подільних матеріалів наведено в табл. 2.5.

Для оцінки ймовірності існування критичної композиції першочерговим завданням було визначити кількість ядерного палива всередині кожного скупчення ПВМ, тому спочатку проаналізували розрахунково-експериментальні дані та результати інструментальних вимірів [42, 20, 43].

Перші виміри кількості палива, що залишилося після аварії в складі лави, проводили у 1988—1990 роках за інтегральним теплометричним методом [44], 1992 року — за балансом  $^{137}\text{Cs}$  в лаві [45], 1993 року — за балансом магнію [28]. Кількість палива в лавах підреакторних приміщень оцінювали візуальним методом [32]. Нові дослідження, збір та верифікація наявних матеріалів [39, 46] стосовно ЛПВМ, що містяться в прим. 305/2, відбулись у 1996—1998 роках (за нижньою оцінкою, в прим. 305/2 маса палива становить не менш як 60 т [46]). Метод досліджень



полягав в узагальненні прямих візуальних спостережень (всіх фото- і відеозйомок) і подальшому комплексному аналізі з урахуванням результатів елементного та радіохімічного аналізу відібраних проб (понад 100 зразків), а також вимірів ЩПН, ПЕД і температури. Це дало змогу побудувати альбом найімовірніших профілів для прим. 305/2 та його поперечних перерізів (всього 13) через кожні 2 м та отримати оцінку загальної кількості палива в прим. 305/2 [47].

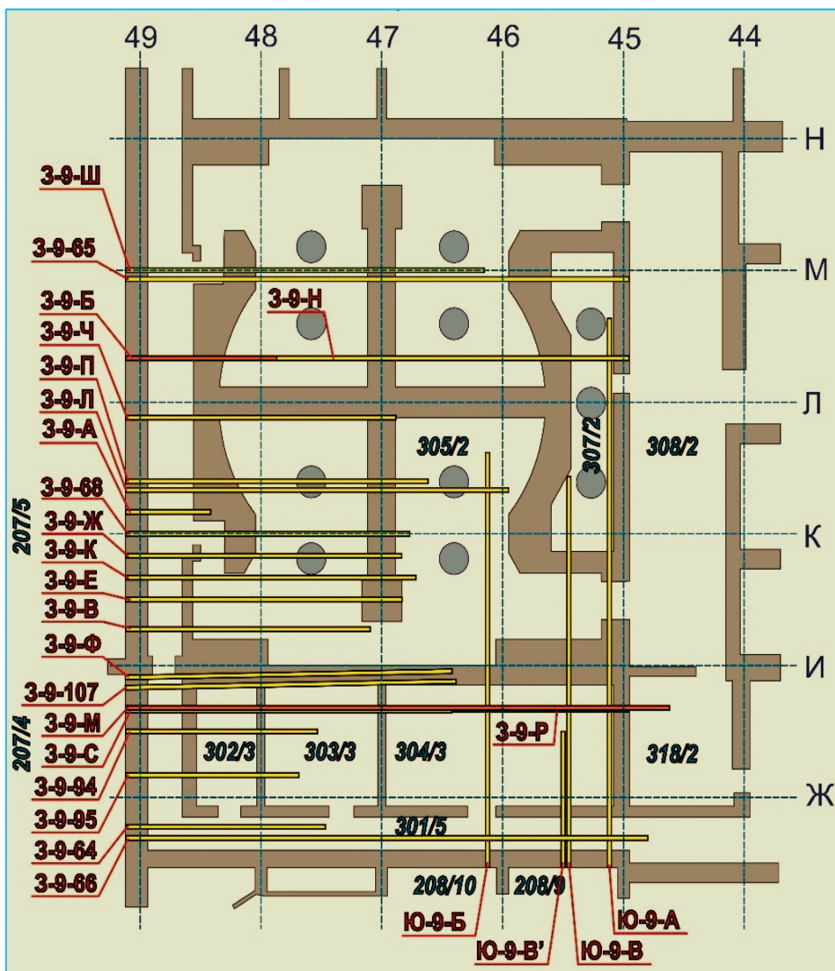


Рис. 2.19 — Горизонтальні проекції свердловин, пробурених у підреакторній плиті в районі позначки +9.00 м

Таблиця 2.5 — Характеристики епіцентру «південного» скупчення  
подільних матеріалів [27]

Параметр	Варіант розрахунку		
	1	2	3
Густина ПВМ, г/см <sup>3</sup>	6,83—7,95	6,47—7,51	6,34—7,01
Густина при максимальній пористості ПВМ, г/см <sup>3</sup>	3,92—4,48	3,73—4,25	3,67—4,00
Об'єм каверни в бетоні ( $h = 1,4$ м)*, м <sup>3</sup>	14,10—16,40	14,90—17,30	16,00—17,70
Об'єм скупчення з високою концентрацією подільних матеріалів ( $h = 0,9$ м), м <sup>3</sup>	9,05—10,53	9,60—11,13	10,28—11,35
Радіус каверни на позначці +9.10, м	1,79—1,93	1,84—1,98	1,91—2,00

\* $h$  — висота (товщина) шару бетону.

У 2002—2010 роках було проведено низку теоретичних і розрахункових робіт, за результатами яких внесли корективи в сценарій утворення чорнобильських лав [34, 35, 36, 38, 39, 47, 48], отримали повніше уявлення про механізм утворення ЛПВМ

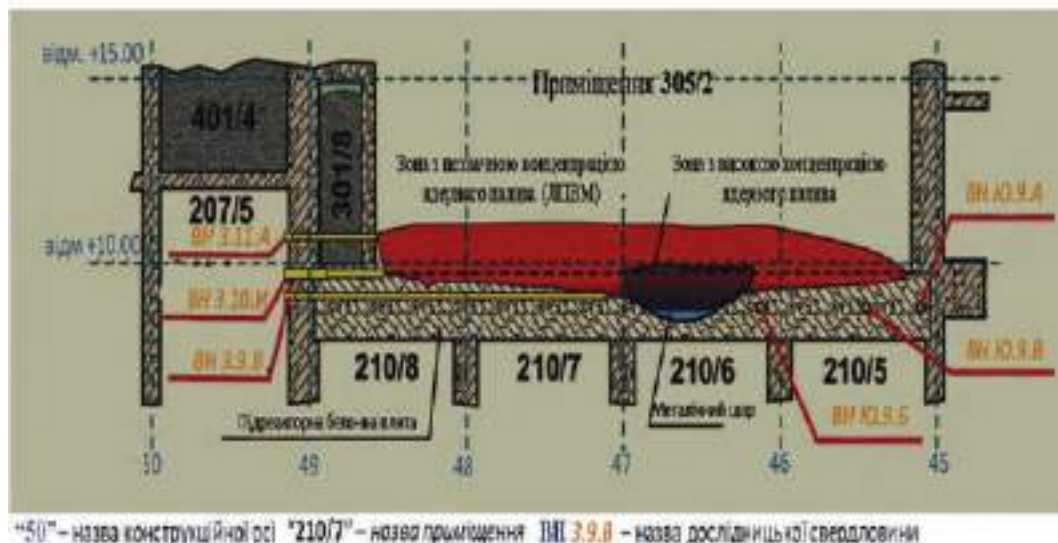


Рис. 2.20 — Тришарова структура скупчення ядерно небезпечних подільних матеріалів у прим. 305/2 [41]

---

---

і обґрунтували можливість сценарію утворення зон з високим вмістом подільних матеріалів. Незалежно від підходів, використаних в оцінці сумарної кількості палива в прим. 305/2, отримано цілком порівнянні результати:

згідно з Технологічним регламентом об'єкта «Укриття» [49] в скупченнях ПВМ, локалізованих у підреакторному приміщенні, міститься 75 (+25, -35) т СМР із середнім вмістом палива близько 26 % при середньому вигорянні 10,8 МВт діб/кг (U);

маса ядерного палива за результатами експериментальних теплотричних досліджень [50] —  $75 \pm 25$ ;

за результатами візуально-аналітичного методу (розбиття на окремі скупчення, усереднення даних аналізів проб, відібраних з прим. 305/2) [39], —  $85 \pm 25$  т (U);

оцінка кількості палива, наведена в роботі [47], фактично збігається з даними, наведеними в роботі [50];

за результатами роботи [26] кількість палива в прим. 305/2 дорівнює  $80 \pm 30$  т (U).

Отже, в прим. 305/2 може міститися близько 80 т СМР, з яких за результатами візуальних обстежень виявлено лише 25 т [32], що свідчить про можливість існування «прихованих» скупчень СМР масою 40—50 т.

Відповідно до даних, отриманих упродовж багаторічних досліджень [41], складено баланс матеріальної моделі утворення скупчень СМР в прим. 305/2 та усунено розбіжності між експериментальними даними, отриманими в результаті теплотричних вимірів, та наявними аналітичними оцінками. Після виконання додаткових робіт (зокрема теплофізичних розрахунків [26, 41]) зведено матеріальний баланс для прим. 305/2 (рис. 2.21) та оцінено кількість ПВМ у двох зонах з підвищеною концентрацією СМР:  $18 \pm 5$  т (U) в «південному» скупченні і  $5 \pm 3$  т — в «північному».

За розрахунками, критична маса низькозбагаченого урану — до 2 % ( $^{235}\text{U}$ ) — варіюється в широких межах: від 0,2 т до десятків тонн залежно від матеріального складу, від вологості особливо, густини, геометрії тощо [48]. Водночас ПБЯ-06-00-88 [51, п. 2.18] регламентує можливість виникнення самопідтримуючої ланцюгової реакції (СЛР) в скупченні подільних матеріалів, збагачення яких за  $^{235}\text{U}$  перевищує 1 %, якщо сумарна маса ізотопів більша ніж 300 г.

Відповідно до розрахунків нейтронно-фізичних параметрів зволоженої силікатної паливної суміші і аналізу температурних полів у бетоні опорної плити в південно-східному секторі підреакторного приміщення 305/2 маса палива в скупченнях ПВМ становить до 20 т (U) зі збагаченням близько 1,15 % ( $^{235}\text{U}$ ). У таких межах можливе існування критичної композиції і, як наслідок, виникнення СЛР. У червні 1990 року після потрапляння води тут був зареєстрований критичний інцидент [43].

Відносно «північного» скупчення з підвищеною концентрацією подільних матеріалів виконані попередні оцінки кількості палива дають підставу вважати, що

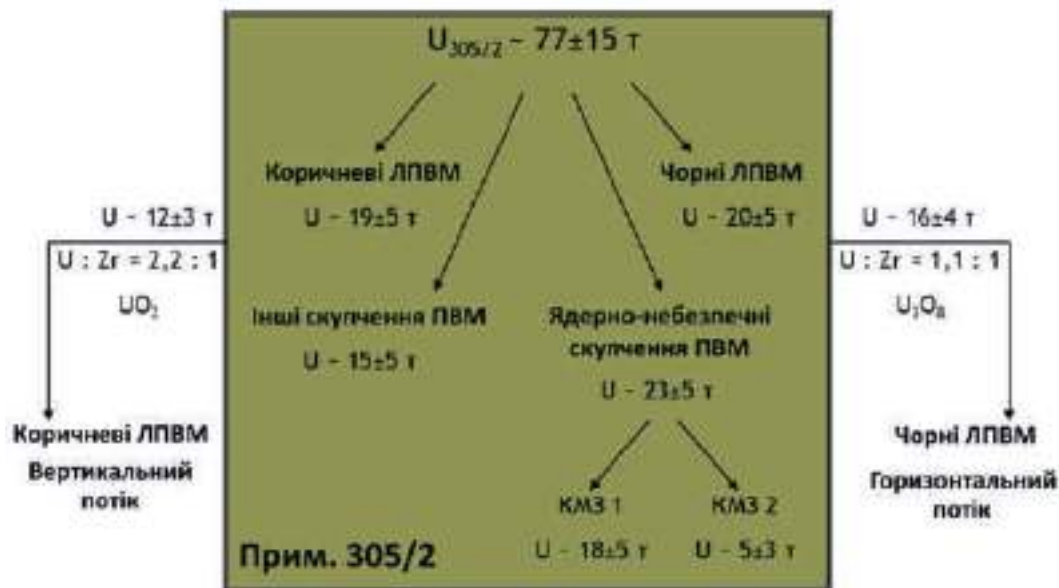


Рис. 2.21 — Схема балансу ядерного палива в прим. 305/2  
(КМЗ — критично масова зона)

існування критичної композиції в цьому скупченні ПВМ малоімовірне. Однак на підставі версії коріумного походження цього скупчення отримано елементний склад, за якого потрібна для існування критичної композиції маса урану може не перевищувати 5 т. Тоді «північне» скупчення ПВМ також може бути потенційно ядерно небезпечним.

Отже, в прим. 305/2 з високою ймовірністю можуть бути дві композиції СМР. А тому існує нагальна потреба у розробці та впровадженні заходів щодо підвищення ефективності контролю їх рівня підкритичності і технічних рішень з превентивного пригнічення чи усунення можливості виникнення в них самопідтримуючої ланцюгової реакції [39].

---

### 2.3 Деструкція лавоподібних паливовмісних матеріалів та прогнози оцінки їх поведінки

Аналізуючи стан ЛПВМ за 35 років після аварії 1986 року, можна дійти висновку, що порівняно з даними обстежень, проведених у перші роки [21, 52], механічна міцність чорних і коричневих ЛПВМ дещо знизилась, а механічна міцність поліхромних ЛПВМ залишається стабільною. Основні чинники, що сприяють руйнуванню ЛПВМ, — це вода, перепади температури і самоопромінення при  $\gamma$ -,  $\beta$ -,  $\alpha$ -розпаді продуктів поділу і трансуранових елементів.

Механічне руйнування чорних ЛПВМ відбувалося в місцях їх контакту з водою, що характерно для низки приміщень. Наприклад, за час спостережень властивості «сталактитів» у прим. 217/2 практично не змінилися. Це пояснюється тим, що «свіжий» бетон, який стівав у прим. 217/2 з півночі на південь, застиг, утворивши своєрідну похилу площину, яка перешкоджає воді входити в контакт зі «сталактитами».

Інша ситуація склалась із «слонячою ногою» (рис. 2.22), що розташована в тому ж приміщенні і зазнає постійного впливу води. 1992 року провели експеримент, в якому досліджували властивості пилу, що утворюється на її поверхні. На поверхню лави поклали марлевий тампон, просочений спеціальною клейкою речовиною. Після застигання клею і приклеювання марлі до поверхні тампон спробували відірвати, а з ним і частинки ПВМ. Однак із відриванням тампону разом з ним легко відокремилася значна частина поверхневого шару лави у вигляді фрагментів розміром у декілька сантиметрів. Отриманий результат виявився несподіваним, оскільки під час відбору зразків «слонячої ноги», який проводили в перші роки після аварії, зважаючи на місця розташування ПВМ, довелося використовувати стрілецьку зброю.

Схожа картина спостерігається і в ББ-1 (рис. 2.23). Обстеживши цю ділянку в 1988 році, встановили наявність шару лави у вигляді суцільної маси. Через кілька років під впливом води, яка періодично заливала цю ділянку підлоги, лава зруйнувалась.

Руйнівний вплив вологості та перепаду температур на механічні властивості ЛПВМ підтверджується і тим, що в сухому і відносно стабільному за температурою прим. 304/3 фрагменти чорних ЛПВМ не зазнали помітних змін і залишилися такими самими, як під час перших обстежень у 1988—1990 роках.

Нагадаємо, що в приміщеннях з високою вологістю в 1990 році на поверхні чорних ЛПВМ виявили «жовті плями», які поступово захоплюють все більшу площу. Це явище також пояснюється хімічними змінами матеріалу ЛПВМ під дією води або її парів.

Практично не змінилася й основна частина зразків ЛПВМ, які зберігались у лабораторних приміщеннях і не піддавалися впливу температур та вологості (рис. 2.24). За станом на 2011 рік зруйнувався тільки зразок чорної кераміки під номером 4 на рис. 2.24, а [52, 21].



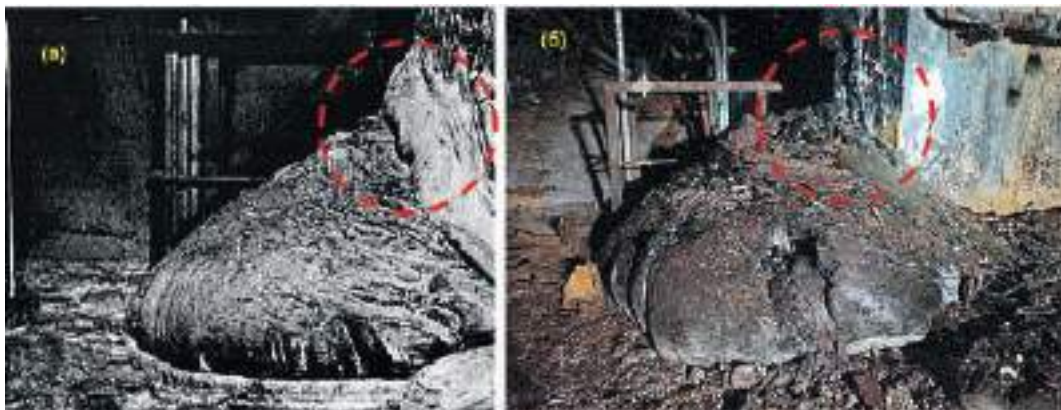


Рис. 2.22 — Руйнування скупчення ЛПВМ «слоняча нога» (прим. 217/2):  
а — фото 1993 року; б — фото 2013 року

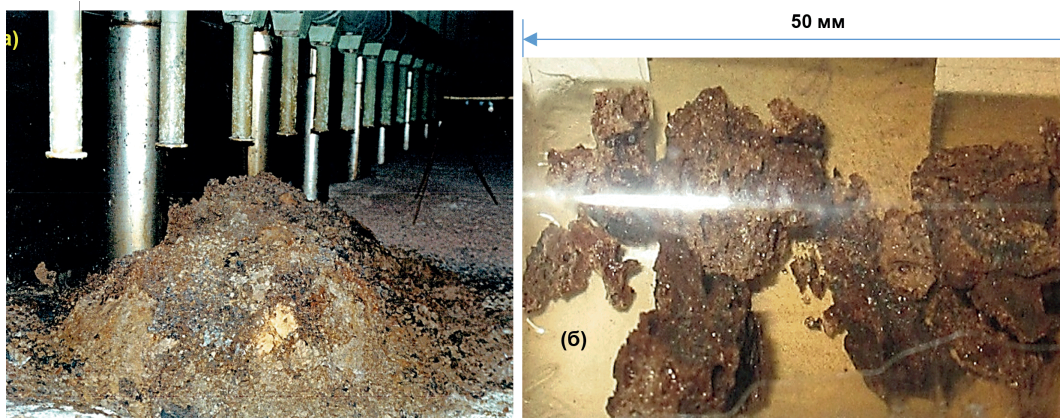


Рис. 2.23 — Руйнування скупчення ЛПВМ на першому поверсі ББ (прим. 012/7):  
а — фото 1993 року; б — фото 2020 року

Аналіз даних показує, що коричневі ЛПВМ зазнали найменших змін своїх властивостей: міцність зразків коричневих ЛПВМ за час зберігання майже не змінилась. Те саме можна сказати про прим. 210/7, оскільки особливих змін коричневих ЛПВМ ні в четвертому клапані, ні на підлозі не помічено (рис. 2.25). Спостерігається збільшення тріщин у застиглій масі коричневих ЛПВМ, що може бути спричинено сезонними коливаннями температури.

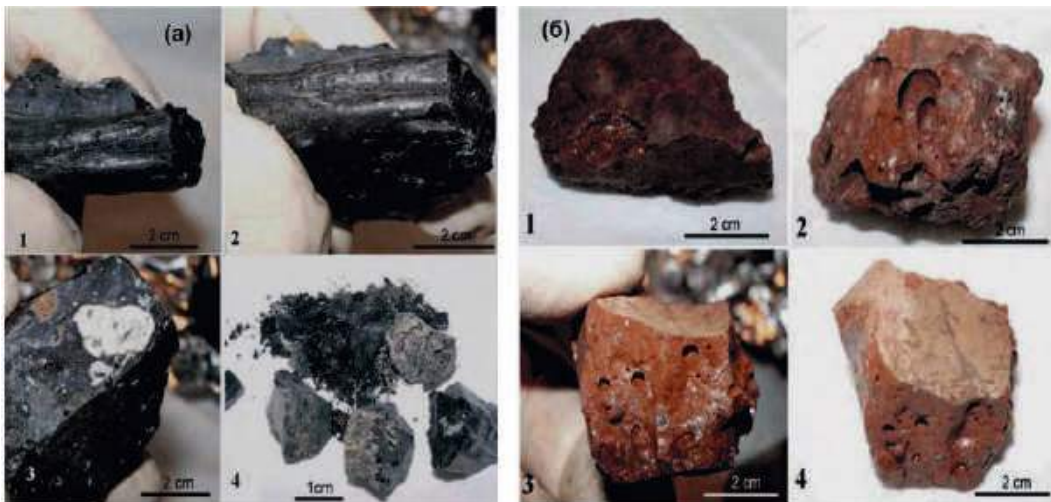


Рис. 2.24 — Зовнішній вигляд зразків ЛПВМ, відібраних 1990 року, які зберігаються в Радієвому інституті ім. В. Г. Хлопіна:  
а — чорні ЛПВМ; б — коричневі ЛПВМ



Рис. 2.25 — Коричневі ЛПВМ в клапані прим. 210/7

Найпомітніше змінилися пемзоподібні ЛПВМ на першому і другому поверсі басейну-барботера через перепади температур та наявність прямого контакту з водою (рис. 2.26).

Вже приблизно через 10 років після аварії значно змінилися і властивості шлакоподібних ЛПВМ [53]. По-перше, склоподібна кірка потріскалася, стала крихкою і лускатою. По-друге, скупчення шлаку на першому й другому поверхах басейну-барботера втратили свою монолітність і стали крихкими — при натисканні гранули з хрускотом розсипаються. Усередині них міцність шлаку більша, ніж на поверхні. Втім така оцінка міцності дуже суб'єктивна. Встановлено, що там, де контакт купи з навколишнім середовищем менший, її міцність більша.

Як видно на рис. 2.26 при великому збільшенні, на поверхні частинок лавоподібних паливовмісних матеріалів є кристалічні утворення розмірами від 1 до 5 мкм. Це пояснюється перекристалізацією



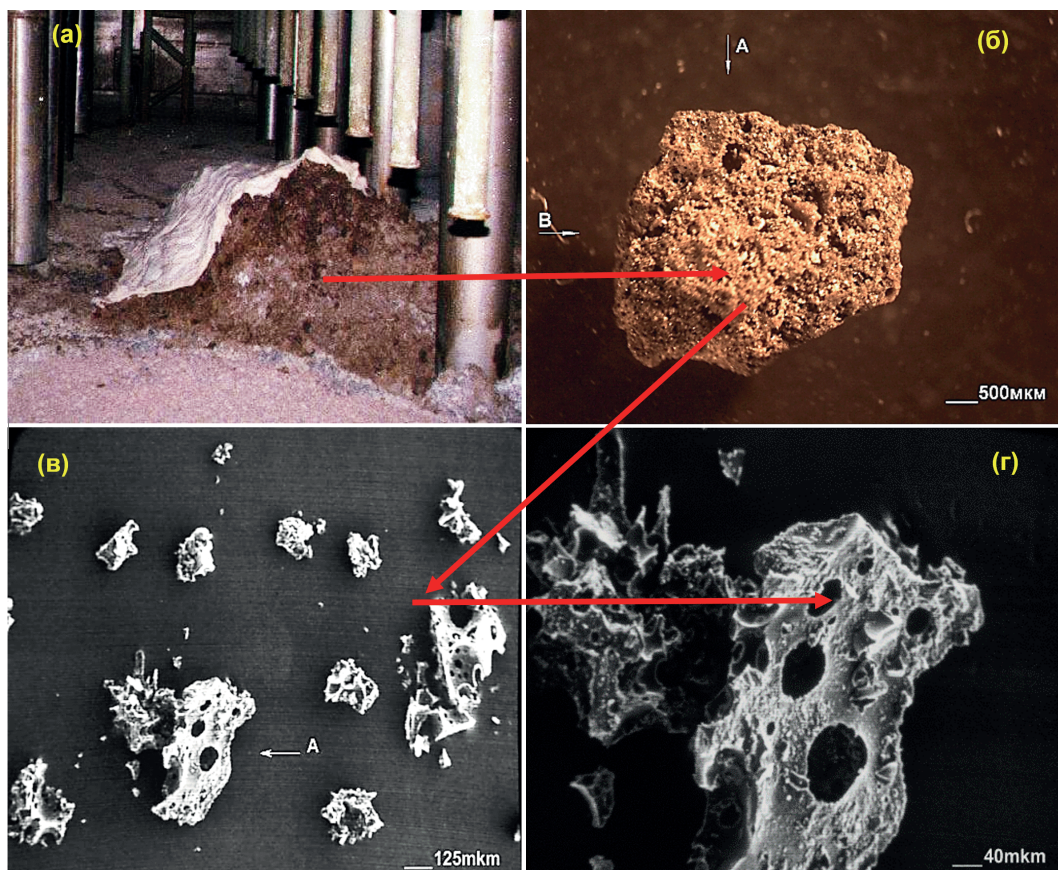


Рис. 2.26 — Загальний вигляд пемзоподібного скупчення ЛПВМ у прим. 012/7:  
 а — скупчення пемзоподібних ЛПВМ в прим. 012/7 на першому поверсі ББ;  
 б — зразок ЛПВМ з цього скупчення; в, г — руйнування зразка ЛПВМ з прим. 012/7  
 на фрагменти розмірами 10—100 мкм

деяких сполук і відкладенням мікрокількості солей на поверхні ЛПВМ під впливом води і температурних градієнтів.

В огляді [54] показана можливість руйнування ЛПВМ у разі замерзання води в порах. Дійсно, пори в ЛПВМ доступні для води, яка взимку може замерзати, помітно збільшуючись в об'ємі. З практики відомо, що такого роду процес є причиною руйнування гірських порід. Але щодо ЛПВМ це не так, оскільки лави мають молекулярно-ситові властивості, і переважна частина об'єму доступної пористості зайнята молекулами води, вбудованими в силікатні цикли. Така вода за низьких температур

---

---

не утворює кристалів льоду і не руйнує силікатних циклів. Ця точка зору знайшла експериментальне підтвердження: після кількох сотень циклів багаторазового охолодження і нагрівання насичених водою ЛПВМ в інтервалі від  $-20$  до  $+50$  °C з одночасною оптичною мікроскопією спеціально вирощених мікротріщин [53, 54] не було помічено зростання їх. Інша справа, що за наявності в скупченнях ЛПВМ великих порожнин замерзла вода може призвести до їх розклинювання і поділу скупчення ЛПВМ на дрібніші фрагменти, що і відбувається регулярно в об'єкті «Укриття» та підтверджено низкою візуальних спостережень.

Проведені спостереження та аналіз літературних даних показують, що головним чинником, який впливає на трансформацію скупчень ЛПВМ, є вода. Під її впливом найбільшим структурним змінам піддалися «пемза», шлак (скупчення першого та другого поверху ББ) і чорні ЛПВМ. Мінімальних структурних змін зазнали коричневі й поліхромні ЛПВМ, які найменше контактують з водою і не піддавалися впливу значних перепадів температур. Зауважимо також, що руйнування скупчень в об'єкті відбуваються і на макрорівні. Через неоднорідний склад, різні умови охолодження тощо багато з них легко розпадаються на окремі, однорідніші й стійкіші до зовнішніх впливів фрагменти.

Ще одне підтвердження негативної дії вологи дали дослідження вилуговування ЛПВМ. Доведено, що швидкорозчинна частина ЛПВМ характеризує кількість субмікронної фракції на поверхні зразків ЛПВМ, яка змивається в перший момент контакту з розчинами. Повільно розчинна фракція — розчинні радіонукліди на поверхні мікротріщин — характеризує безпосереднє розчинення матриці ЛПВМ і процес дифузії радіонуклідів з глибини фрагментів до поверхні та розчинення.

Аналіз отриманих даних показує, що за несприятливих умов, у разі деградації ЛПВМ на фрагменти 3—5 мм у воді об'єкта «Укриття», чорні ЛПВМ розчиняться приблизно через 1400 років, коричневі — через 5800 років, а поліхромні — більш як за 10 000 років. При цьому близько 0,08—0,2 % коричневих і чорних ЛПВМ розчинилися в перші місяці контакту з водою.

Після встановлення НБК основні руйнівні фактори ЛПВМ усунені. Припинилося надходження атмосферних опадів, стабілізувався температурний режим, завдяки чому зменшився об'єм конденсаційної вологи. Процес деградації ЛПВМ сповільниться і визначатиметься переважно утворенням мікротріщин і пор через самоопромінення  $\alpha$ -частинками.

Динаміка стану ЛПВМ тісно пов'язана з впливом процесів, що зумовлюють їх диспергування та вилуговування радіонуклідів. З часом це призводить до збільшення кількості радіоактивного пилу в об'єкті «Укриття». Незважаючи на значний обсяг проведених досліджень, механізми деградації ПВМ дотепер не можна вважати твердо встановленими.

Дослідження процесу окислення ядерного палива в повітряному середовищі [55] за допомогою вимірів магнітної сприйнятливості визначили ступінь доокислення



---

---

опроміненого та неопроміненого ядерного палива. Експериментально розраховано ступінь утворення  $U_3O_8$  на поверхні  $UO_2$ . Результати роботи показали, що процес окислення для опроміненого палива відбувається повільніше, ніж для свіжого.

На сьогодні вважається, що ядерне паливо, яке перебуває в об'єкті «Укриття» у вигляді ФАЗ (паливні таблетки, збірки твелів та їх фрагменти), є достатньо стійким з огляду на умови середовища об'єкта.

Дослідження ЛПВМ, проведені раніше, враховували тільки три основних механізми деградації їх: руйнування поверхні ЛПВМ і, як наслідок, генерація радіоактивного аерозолі; виникнення на поверхні ЛПВМ новоутворень у вигляді сполук урану; вилуговування радіонуклідів з ЛПВМ водою. З часом під дією різних чинників внаслідок фізико-хімічних процесів стан і властивості паливовмісних матеріалів змінюються, що погіршує стан радіаційної безпеки об'єкта «Укриття». Нині спостерігаються три основні процеси деградації ЛПВМ [3, 56]:

- розтріскування лав на досить грубі шматки (див. рис. 2.22);

- руйнування з утворенням радіоактивного пилу;

- вилуговування радіонуклідів при взаємодії лав з водою та утворення нових розчинних хімічних сполук.

Пилогенеруюча здатність ЛПВМ та опроміненого ядерного палива є притаманною їм властивістю і має місце без дії додаткових зовнішніх чинників [54, 56]. Щорічно в об'єкті «Укриття» через спонтанний механізм пилогенерації на пил перетворюється не менш як декілька десятків кілограмів опроміненого палива. Фізика цього явища досить складна і вивчена не до кінця. Ймовірною причиною такої спонтанної пилогенерації є специфічна природа об'єктів. ЛПВМ та опромінене ядерне паливо являють собою високорадіоактивні діелектрики, які продукують з поверхні потік  $\beta$ -частинок з густиною струму до  $0,1 \text{ нА/см}^2$ , що зумовлює наявність помітних градієнтів електричного потенціалу і механічної напруги на їх поверхні. Електростатичні взаємодії забезпечують як пилогенеруючу здатність, так і високу рухливість дисперсної фази, що відокремлюється з поверхні [57]. Явище спонтанного пилоутворення поверхнею ЛПВМ та опроміненого палива вперше надійно зареєстровано експериментально ще 1997 року [58].

Як приклад наведемо результати досліджень відібраних 2014 року зразків у прим. 012/7. Проба ЛПВМ мала найбільшу питому радіоактивність. Частинки, локалізовані за допомогою цифрової та трекової авторадіографії, були виділені й вивчені комплексом методів [59]. Розмір виявлених частинок досягав  $200 \text{ мкм}$ . За їх морфологією можна припустити, що це уламки механічно зруйнованого пористого скла. Усередині скломатриці спостерігалися включення  $U\text{-}Zr\text{-}O$ -фази розмірами від одиниць до десятків мікронів з різними співвідношеннями  $U$  та  $Zr$  (рис. 2.27). За даними електронної мікроскопії та рентгенівської томографії, ці включення є дендритами діоксиду урану з домішкою конструкційного цирконію. Дослідження одного

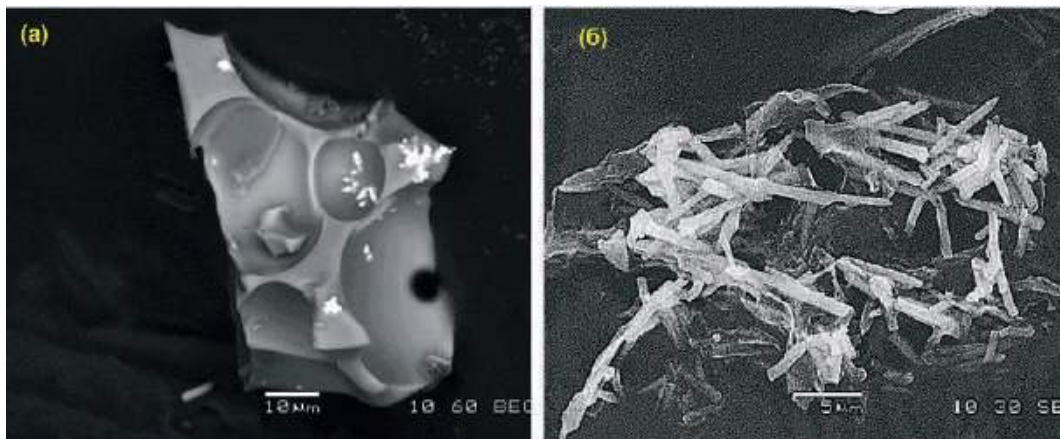


Рис. 2.27 — РЕМ-зображення дрібнодисперсних зразків, зібраних на планшет у прим. 012/7:  
 а — уламок склоподібної матриці з включеннями U-Zr-O-фази;  
 б — голчасті кристали на поверхні уламка скла

із зразків на монокристальному дифрактометрі показало, що дендрит, ймовірно, складається з кількох (мінімум п'яти) монокристалів  $\text{UO}_{2+x}$ . На поверхнях порожнин (ймовірно, бульбашок) виявлені скупчення голчастих кристалів, що містять Na-U-S-O (без Zr) і, ймовірно, є водорозчинними уран-сульфатами (рис. 2.27, б).

Отримані результати демонструють, що джерелом радіоактивних частинок, які потрапили в кювету, були фрагменти ЛПВМ в прим. 012/7, що спонтанно руйнуються. Спостереження за ними та детальний аналіз їх потрібні для вивчення і прогнозування поведінки матеріалів, що утворилися внаслідок аварії.

Спроби експериментального дослідження ЛПВМ методом рентгеноструктурного аналізу не допомогли з'ясувати детально механізми деградації ЛПВМ [60], тому вивчати ЛПВМ не можна за стандартними методиками і за допомогою звичайного обладнання. Для цього треба розробляти спеціальні методичні прийоми, а також використовувати сучасну дослідницьку апаратуру. Після модернізації рентгенівського дифрактометра ДРОН-4М в ІПБ АЕС досліджено фазовий склад кристалічних фаз у всіх видах лав. На прикладі коричневої кераміки [61] показано наявність не тільки оксиду урану, а й силікату урану, оксиду кремнію та кубічного оксиду цирконію (рис. 2.28).

Завдяки розробленому методу виявлення рентгенівських ліній низької інтенсивності з використанням рентгенівського фазового аналізу матеріалів, які мають у своєму складі багато (понад вісім) кристалічних фаз з низьким вмістом їх (від кількох відсотків до кількох десятих відсотка за масою), вдалося значно розширити перелік кристалічних фаз у ЛПВМ. Цей метод базується на розрахунках кореляцій із

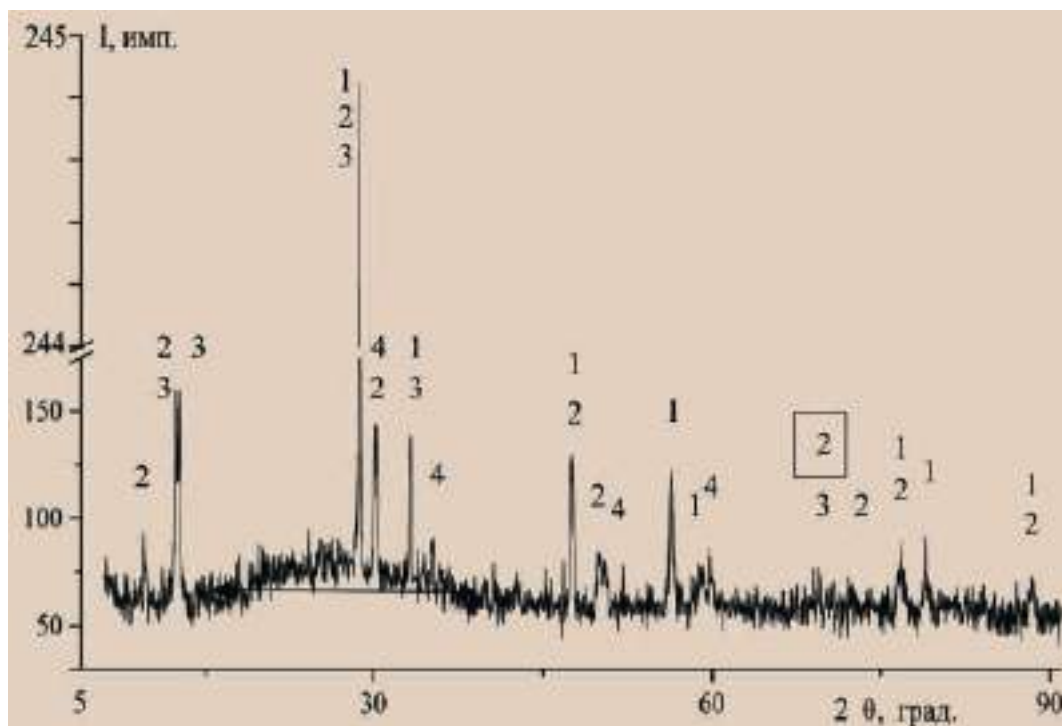


Рис. 2.28 — Дифрактограма коричневої кераміки:

1 — оксид урану  $\text{UO}_{2,34}$ ; 2 — силікат урану  $\text{USiO}_7$ ; 3 — орторомбічний оксид кремнію  $\text{SiO}_2$ ; 4 — кубічний оксид цирконію  $\text{ZrO}_2$

застосуванням підходів комп'ютерної статистики. Кореляційну дифрактограму наведено на рис. 2.29 [62].

Дані кореляційної дифрактограми дали змогу не лише підвищити надійність ідентифікації (кількість відображень) згаданих кристалічних фаз ( $\text{UO}_{2,34}$ ,  $\text{USiO}_7$ , орторомбічний  $\text{SiO}_2$  і кубічний  $\text{ZrO}_2$ ), але й встановити наявність у зразку тетрагонального оксиду цирконію  $\text{ZrO}_2$ , цілої низки фаз оксиду кремнію  $\text{SiO}_2$ , силікату цирконію  $\text{ZrSiO}_4$ , силікату кальцію  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  і силікату алюмінію  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  (рис. 2.29).

За отриманими даними фазового складу коричневої кераміки оновлено модель еволюції мікроструктури ЛПВМ. Встановлено, що поведінка ЛПВМ визначається не одним або кількома фізичними і хімічними процесами, а їх взаємозв'язком і взаємовпливом.

Схематично мікроструктура коричневої кераміки ЛПВМ, з урахуванням нових даних, зображена на рис. 2.30. Включення оксидів урану тепер представлені оксидом

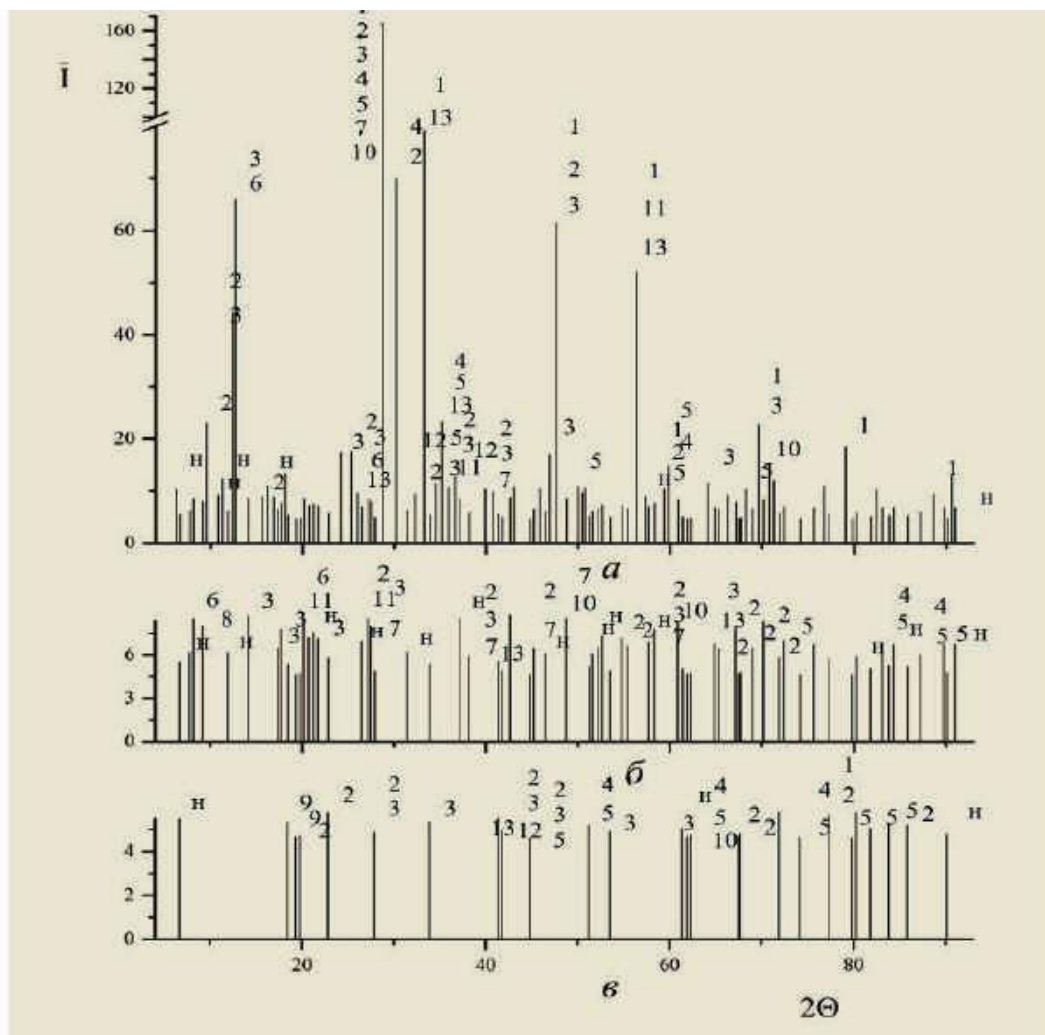


Рис. 2.29 — Дифрактограми від зразка коричневої кераміки:

*a* — кореляційна дифрактограма; *б* — області кореляційної дифрактограми з відображеннями меншими за 8 імп.; *в* — області кореляційної дифрактограми з відображеннями меншими за 5,5 імп.; 1 —  $\text{UO}_{2,34}$ ; 2 —  $\text{USiO}_3$ ; 3 — орторомбічний (1)  $\text{SiO}_2$ ; 4 — кубічний  $\text{ZrO}_2$ ; 5 — тетрагональний  $\text{ZrO}_2$ ; 6 — орторомбічний (2)  $\text{SiO}_2$ ; 7 — тригональний (1)  $\text{SiO}_2$ ; 8 — тетрагональний (1)  $\text{SiO}_2$ ; 9 — тригональний (2)  $\text{SiO}_2$ ; 10 — тетрагональний (2)  $\text{SiO}_2$ ; 11 —  $\text{ZrSiO}_4$ ; 12 —  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ; 13 —  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ; н — неідентифіковані відображення



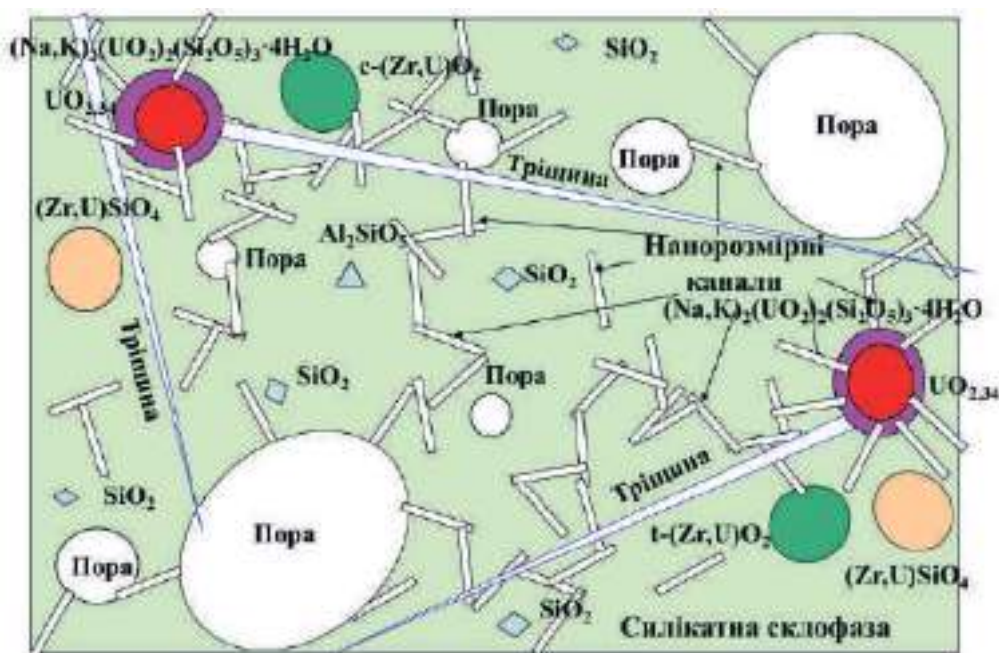


Рис. 2.30 — Схема мікроструктури коричневої кераміки ЛПВМ з урахуванням нових даних

урану  $\text{UO}_{2.34}$ . Замість включень цирконій-уран-кисневої фази  $(\text{U,Zr})\text{O}_x$  наявні включення оксиду цирконію, які мають кубічну та тетрагональну структуру. Кристалічні фази оксидів цирконію є результатом кристалізації (принаймні, частини) аморфної цирконій-уран-кисневої фази  $(\text{U,Zr})\text{O}_x$  після аварії. Також наявні включення силікату цирконію, відомого як «чорнобіліт»  $(\text{Zr,U})\text{SiO}_4$ . Нещодавно виявлений ураніл-силікат-гідрат калію-натрію  $(\text{K,Na})_2(\text{UO}_2)_2(\text{Si}_2\text{O}_5)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (мінерал віксіт, weeksite), найімовірніше, міститься в зоні контакту оксиду урану  $\text{UO}_x$  та силікатної склофази по поверхні включень оксиду урану. Він сформувався як результат взаємодії оксиду урану, включень оксиду урану та оксидів кремнію, натрію і калію склофази ЛПВМ і води. Силікатна склофаза ЛПВМ містить кілька раніше невідомих фаз оксиду кремнію  $\text{SiO}_2$ : орторомбічну (1), орторомбічну (2), тригональну і, можливо, тетрагональну. Також у силікатній склофазі є силікат алюмінію  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  і, можливо, силікат кальцію  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ . Всі фази оксиду кремнію та силікати сформувалися частково внаслідок кристалізації багатокомпонентного силікатного розплаву при його охолодженні під час аварії та частково — внаслідок кристалізації склофази протягом тривалого часу після аварії.

---

Поровий простір коричневої кераміки представлений великими та малими газовими порами, тріщинами і нанорозмірними поровими каналами (рис. 2.30) [63, 64]. Об'єм газових пор не змінився. Істотного збільшення об'єму тріщин і нанорозмірних порових каналів не спостерігається. Нанорозмірні порові канали пронизують склофазу і всі кристалічні включення коричневої кераміки. Вони з'єднують газові пори та тріщини між собою та із зовнішнім середовищем.

2016 року, створюючи модель еволюції мікроструктури ЛПВМ, серед великої кількості фізичних і хімічних процесів, що проходили в ЛПВМ протягом 30 років після аварії, виділили ті, які визначали формування їх мікроструктури [65]:

формування відкритих порових каналів у ЛПВМ внаслідок об'єднання, принаймні, частини треків  $\alpha$ -частинок, що утворилися при  $\alpha$ -розпаді радіонуклідів;

проникнення кисню повітря до включень оксидів урану по відкритих нанорозмірних порових каналах;

окислення киснем повітря оксиду урану  $UO_2$  у включеннях;

формування тріщину ЛПВМ через збільшення об'єму включень оксидів урану;

проникнення води в ЛПВМ по тріщинах до включень оксидів урану;

руйнування ЛПВМ при коливаннях температури через зміну агрегатного стану води, яка міститься в газових порах і тріщинах;

взаємодія води та розчинених у ній солей і газів з оксидами урану та продуктами активації, утворення гідратів і розчинних сполук урану та трансуранових елементів.

Оновлюючи модель еволюції мікроструктури ЛПВМ, до вже виділених фізичних і хімічних процесів додамо ще два:

радіаційно стимульоване фазоутворення ураніл-силікат-гідрату натрію-калію  $(Na,K)_2(UO_2)_2(Si_2O_5)_3 \cdot 4H_2O$ ;

кристалізація фаз оксиду кремнію  $SiO_2$  (ортормбічного (1), орторомбічного (2), тригонального і, можливо, тетрагонального), силікату алюмінію  $Al_2SiO_5$  і, можливо, силікату кальцію  $Ca_2SiO_4$  в силікатній склофазі та можлива кристалізація кубічного і тетрагонального оксидів цирконію  $ZrO_2$  в аморфній цирконій-уран-кисневій фазі  $(Zr,U)O_x$ .

2016 року в моделі еволюції мікроструктури ЛПВМ виділили стадії еволюції мікроструктури внутрішнього об'єму ЛПВМ, визначили їх послідовність та оцінили їх тривалість.

Стадія 1 — формування відкритої пористості, що є результатом об'єднання закритих сферичних пор знов сформованими нанорозмірними поровими каналами, які, так само, є результатом об'єднання накопичених у матеріалі треків  $\alpha$ -частинок. Початок стадії — після аварії, її тривалість — до 10...12 років.

Стадія 2 — окислення оксидів урану  $UO_x$  у включеннях ЛПВМ через проникнення повітря по відкритих нанорозмірних порових каналах. Початок — після закінчення стадії 1 (1996—1998), тривалість — від трьох до п'яти десятиліть до руйнування ЛПВМ.

---

---

Стадія 3 — формування тріщин у ЛПВМ внаслідок збільшення об'єму включень оксидів урану  $\text{UO}_x$  при їх окисленні. Початок — в 2004...2011 роках, тривалість — від трьох до п'яти десятиліть до руйнування ЛПВМ.

Стадія 4 — проникнення води в ЛПВМ по тріщинах та взаємодія її з включеннями оксидів урану; вихід у довкілля солей урану з включень; руйнування частини ЛПВМ внаслідок багаторазового замерзання та відтавання води у порах і тріщинах; вихід частинок оксидів урану  $\text{UO}_x$  у довкілля. Початок — 2004...2011 роки. Після закінчення будівництва нового безпечного конфайнмента ця стадія практично припинилася. Атмосферні опади до НБК не проникають, і процеси стадії 4 істотно сповільнилися.

Відповідно до нових даних щодо фазового складу ЛПВМ, отриманих у 2016—2020 роках, виділено ще дві стадії еволюції мікроструктури внутрішнього об'єму ЛПВМ.

Стадія 5 — радіаційно стимульоване фазоутворення ураніл-силікат-гідрату натрію-калію  $(\text{Na,K})_2(\text{UO}_2)_2(\text{Si}_2\text{O}_5)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . Початок — 1996...1998 роки (можливо й пізніше, 2004...2011 роки). Поетапний розвиток процесу радіаційно стимульованого фазоутворення ураніл-силікат-гідрату натрію-калію триватиме п'ять — сім десятиліть до повного «використання» оксиду урану у включеннях.

Стадія 6 — кристалізація аморфних фаз ЛПВМ: склофазизація з формуванням декількох фаз оксиду кремнію  $\text{SiO}_2$ , силікату алюмінію  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  і, можливо, силікату кальцію  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ , а також аморфної фази  $(\text{Zr,U})\text{O}_x$  з формуванням кубічного та тетрагонального оксидів цирконію. Початок — після аварії, триватиме від чотирьох до шести десятиліть до переходу в кристалічний стан склофазизації ЛПВМ і аморфної фази  $(\text{Zr,U})\text{O}_x$ .

Коричнева кераміка нині проходить стадії 2, 3, 5 і 6.

Запропонована оновлена модель еволюції мікроструктури дає змогу прогнозувати поведінку ЛПВМ на найближчу та віддалену перспективу. Самоопромінення ЛПВМ триватиме. Чи буде збільшуватися об'єм нанорозмірних порових каналів, сказати важко; за останні п'ять років він практично не змінився. Процес окислення оксиду урану  $\text{UO}_x$  у включеннях триватиме. Об'єм тріщин, їх довжина і, можливо, кількість збільшуватимуться із збільшенням об'єму включень оксидів урану. Проникнення води в ЛПВМ по тріщинах до включень оксидів урану в умовах НБК вже істотно сповільнилося. Взаємодія води з оксидом урану  $\text{UO}_x$ , утворення гідратів і розчинних сполук урану практично припинилося. Радіаційно стимульоване фазоутворення ураніл-силікат-гідрату натрію-калію  $(\text{Na,K})_2(\text{UO}_2)_2(\text{Si}_2\text{O}_5)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  триватиме. Кристалізація фаз оксиду кремнію  $\text{SiO}_2$  і силікатів у силікатній склофазі також триватиме, так само, як і можлива кристалізація кубічного та тетрагонального оксидів цирконію  $\text{ZrO}_2$  в аморфній цирконій-уран-кисневій фазі  $(\text{Zr,U})\text{O}_x$ .

Згідно з рівноважною діаграмою стану «уран — кисень» оксиди урану мають кубічну решітку від оксиду урану  $\text{UO}_2$  до оксиду  $\text{UO}_{2,25}$ . У включеннях коричневої кераміки ЛПВМ оксид урану  $\text{UO}_{2,34}$  існує з кубічною решіткою завдяки тому, що

---

---

ці включення мають стиснений стан у склофазі. Однак під час протікання процесу окислення стехіометричний коефіцієнт кисню підвищуватиметься, об'єм включень збільшуватиметься, кількість та довжина й ширина тріщин зростатимуть. Після досягнення порогових значень концентрації тріщин та їх довжини ЛПВМ почнуть руйнуватися на частинки матеріалу з середніми розмірами 100—200 мкм (розкид розмірів — від 50 до 500 мкм) тому, що не витримають навіть власної ваги. Ці частинки склофазы міститимуть уран, продукти поділу та активації. За межі ЛПВМ потраплять всі включення оксидів урану. У зруйнованому матеріалі не буде напружень, які стискали включення, кубічний оксид урану  $UO_x$  зі значенням  $x$  більшим ніж 2,34 перейде в суміш оксидів: кубічний оксид урану  $UO_{2,25}$  і орторомбічний оксид урану  $U_3O_8$ . Із перебудовою кубічної решітки на орторомбічну зерна оксиду урану руйнуватимуться до розмірів у кілька мікронів, а частина з них, можливо, і до субмікронного рівня. Саме ці частинки оксиду урану  $UO_x$  і є найнебезпечнішими.

Коли значення  $x$  досягне 2,66, оксид урану у включеннях повністю перейде в оксид урану  $U_3O_8$  з орторомбічною решіткою. Це призведе до зменшення густини оксиду урану у включеннях до 8,39 г/см<sup>3</sup> і до відповідного збільшення їх об'єму (на 23,5 %). В результаті ЛПВМ повністю зруйнуються. Всі включення оксиду урану  $U_3O_8$  опиняться поза межами ЛПВМ.

Значення  $x$  збільшилось від 2,25 до 2,34 (на 0,09) протягом 7—14 років, за період з 2004—2011 до 2018 року. За нинішньої швидкості окислення із збільшенням стехіометричного коефіцієнта кисню до 2,66 (на 0,32) руйнування ЛПВМ можна чекати через 25—50 років, тобто між 2043—2068 роками. Втім, швидкість окислення може зрости внаслідок збільшення товщини тріщин у разі збільшення розмірів включень оксиду урану.

На 2018 рік вміст ураніл-силікат-гідрату натрію-калію  $(Na,K)_2(UO_2)_2(Si_2O_5)_3 \cdot 4H_2O$  в ЛПВМ становив 3—4 % (мас.), тобто 3—4 г в 100 г ЛПВМ. Ця кількість ураніл-силікату утворилася орієнтовно за 7—14 років (за період з 2004—2011 років до 2018 року). Для її «отримання» витрачено 1,5—2 г оксиду урану  $UO_2$ . Відповідно за нинішньої швидкості формування ураніл-силікат-гідрату весь наявний оксид урану, тобто 4,5—5,5 % (мас.), витратиться через 20—41 рік, тобто до 2038—2059 років.

Однак треба врахувати, що хоча після термообробки коричневої кераміки ЛПВМ (600 °C, 10 год, повітря) вміст безводного ураніл-силікату натрію-калію збільшився з 3—4 % (мас.) до 10—14% (мас.), руйнування ЛПВМ не сталося. Об'єм ураніл-силікат-гідрату зростає через 9—16 років, тобто до 2027—2034 років ніякого руйнування ЛТСМ не буде.

Проходження двох процесів: окислення оксиду урану  $UO_x$  у включеннях і радіаційно стимульоване фазоутворення ураніл-силікат-гідрату натрію-калію  $(Na,K)_2(UO_2)_2(Si_2O_5)_3 \cdot 4H_2O$  — впливають одне на одного. Обидва процеси ведуть до збільшення об'ємів включень оксиду урану або об'ємів ураніл-силікату,



---

збільшення формування тріщин і руйнування ЛПВМ. Оксид урану та ураніл-силікат-гідрат з включень залишать ЛПВМ. Спільний перебіг цих процесів може зменшити тривалість стадій 5 і 6 та призвести до руйнування ЛПВМ раніше.

Використавши залежність відносного об'єму кристалічної фази від часу (s-подібні криві кристалізації) в допущенні, що кристалізується не шість фаз, а одна, виконано оцінки часу до початку руйнування ЛПВМ при розвитку процесу кристалізації склофази. Вони показують, що процес кристалізації може підійти до швидкої (або лавиноподібної) стадії за 14—21 рік (до 2032—2039 років). При цьому в ЛПВМ може зруйнуватися значна частина склофази на частинки з середніми розмірами 20—50 мкм (у діапазоні розмірів від 10 до 120 мкм).

Кристалізація декількох фаз може призвести до того, що швидких стадій кристалізації може бути кілька (до шести, за кількістю відомих на даний час фаз, які є результатом кристалізації). Але декілька швидких стадій можуть і не перейти в лавиноподібну стадію. Багатофазна кристалізація ЛПВМ потребує подальшого дослідження.

Виконуючи роботи з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему, фахівці підходять до необхідності розробки технології поводження з ЛПВМ, наприклад методами твердофазного кондиціонування. Дослідження мікроструктури, фізико-хімічних властивостей ЛПВМ і прогнозування їх еволюції сприяли накопиченню досвіду роботи з цими матеріалами. Так само і мікроструктура ЛПВМ підказує нам деякі шляхи поводження з ними. ЛПВМ є термодинамічно метастабільними матеріалами тому, що основна (за масою) їх фаза — склофаза — є аморфним матеріалом, в якому відбувається процес кристалізації, тобто перехід метастабільного аморфного стану в стабільний кристалічний. Якщо матеріал прагне перейти в стабільніший стан, ми можемо допомогти йому в цьому — провести керовану кристалізацію склофази ЛПВМ: зробити його термообробку, щоб управляти зародженням кристалічних зародків, організувати їх кероване зростання, не допустити руйнування завдяки активації процесу спікання вже кристалічного матеріалу, визначити, якщо можна, потрібні для кристалізації фази і послідовність кристалізації, яку можна реалізувати.

Аналіз мікроструктури ЛПВМ та фізичних і хімічних процесів, які її визначають, вказує на те, що проблемним елементом мікроструктури є включення оксиду урану  $\text{UO}_x$ . Саме вони збільшують свій об'єм через окислення оксиду урану  $\text{UO}_x$  та радіаційно стимульоване формування ураніл силікат гідрату натрію-калію  $(\text{Na,K})_2(\text{UO}_2)_2(\text{Si}_2\text{O}_5)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . Тому будь-які впливи на ЛПВМ, що дають змогу перевести оксид урану  $\text{UO}_x$  в сполуки, які не взаємодіють з киснем та водою, можуть розглядатись як корисні для переведення ЛПВМ у стабільніший стан. Також важливо, якщо змога, зменшити розмір включень оксиду урану  $\text{UO}_x$  (бажано до розмірів, менших за 1 мкм) завдяки перерозподілу їх у ЛПВМ: перерозподілити оксид урану та його сполуки по поровому просторові, тріщинах та газових порах.

---

---

Якщо проводити термообробку ЛПВМ, то з'являється можливість активізувати радіаційно стимульоване фазоутворення ураніл-силікату калію-натрію, тим самим зв'язавши оксид урану  $UO_x$  в сполуку, яка може мати більшу корозійну стійкість, ніж оксид урану. Термообробка ЛПВМ також дає змогу домогтися повного закриття нанорозмірних порових каналів (при 150—400 °C) і повного закриття тріщин (при 200—530 °C), що забезпечить закриття порового простору та, відповідно, зменшення поверхні ЛПВМ.

## 2.4 Оцінка рівня ядерної безпеки об'єкта «Укриття»

Основним принципом, який визначає всю діяльність з технічного забезпечення ядерної безпеки скупчень ПВМ на об'єкті «Укриття», є *принцип виключення*, тобто унеможливлення виникнення самопідтримуючої ланцюгової реакції (СЛР) за існуючих умов і забудь-яких передбачуваних змін існуючих умов [66]. При цьому СЛР завжди розглядається як гіпотетична подія, що є результатом існування і/або настання якихось умов, які на рівні доступних знань і наявного досвіду передбачити неможливо. Отже, якщо СЛР не можна виключити як гіпотетичну подію, то об'єкт залишається потенційно ядерно небезпечним і, відповідно, потрібні моніторинг основних параметрів (ЩПН, ПЕД, температури і вологості) цих скупчень та оперативний контроль їхнього рівня підкритичності.

Моніторинг нейтронної активності скупчень СМР завжди був першочерговим завданням. Системи контролю ядерної безпеки «Шатер» і «Фініш» розробили й впровадили в перші роки після аварії (рис. 2.31). Комплекс «Шатер» був зданий в експлуатацію 1987 року, призначався для реєстрації поточних параметрів ПВМ: щільності нейтронного потоку, потужності експозиційної дози  $\gamma$ -випромінювання, температури, теплових потоків — і мав стати основною штатною системою контролю об'єкта «Укриття». Проте детектори комплексу були розташовані через об'єктивні причини на периферії, далеко від скупчень ПВМ, і давали недостатньо інформативні показання. Після відпрацювання свого ресурсу систему зняли з експлуатації 2000 року, а на її місце прийшла *інформаційно-дослідницька система (ІДС) «Фініш»*.

ІДС «Фініш-І» формувалась кропітким відбором інформативних каналів і мала статус суто дослідницької. У грудні 1998 року зі складу дослідницької системи «Фініш» виокремили самостійний комплекс технічних засобів для забезпечення регламентного контролю стану підкритичності ПВМ, який отримав назву «Фініш-Р».

Система «Фініш-Р» включала 21 регламентний канал і мала в своєму складі 40 вимірювальних каналів, зокрема три канали контролю ЩНП, чотири канали вимірювання ПЕД, 26 каналів вимірювання температури, шість каналів контролю

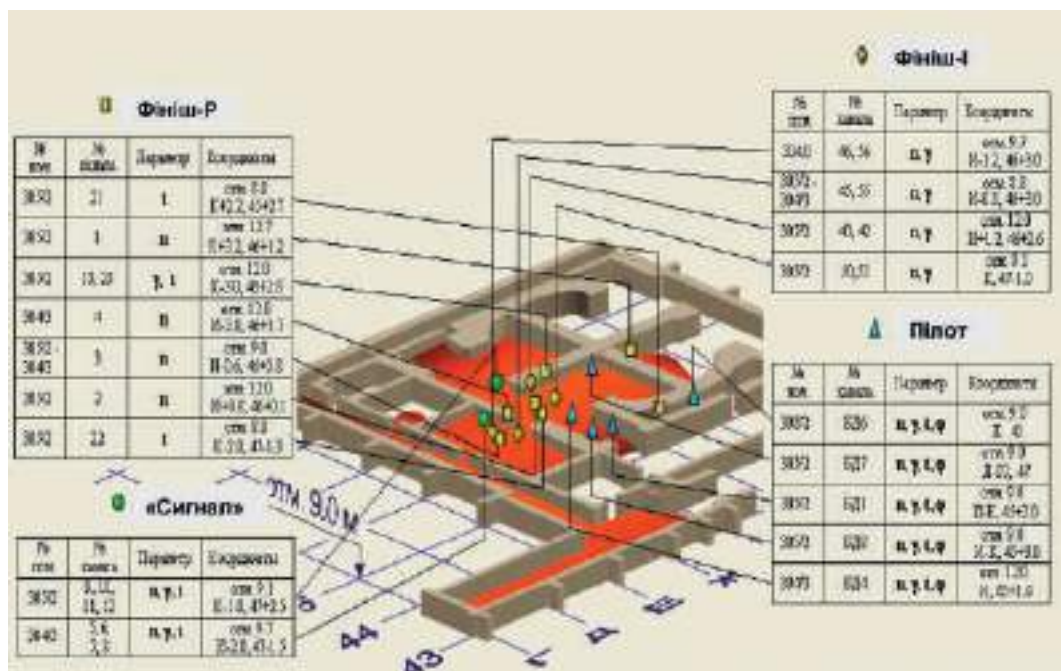


Рис. 2.31 — Розташування систем контролю ядерної безпеки ПВМ об'єкта «Укриття» на позначці +9.00 м

теплового потоку, один канал вимірювання вологості (див. рис. 2.31). Оскільки система «Фініш-Р» виділилася з дослідницької системи, остання використовувалась як «випробувальний полігон» і «гарячий резерв». Основні завдання дослідницької системи:

- забезпечення експериментальних і дослідних робіт щодо оцінки підкритичності ядерно небезпечних зон у прим. 305/2, ЦЗ та реакторного простору;
- забезпечення альтернативного контролю стану ПВМ у прим. 305/2;
- відпрацювання нових технічних рішень і методик контролю;
- дослідження і відпрацювання нових маршрутів постановок інформаційних каналів.

З метою розширення точок контролю паралельно з названими системами розробили і впровадили систему контролю ТСМ «Сигнал». Перша її черга була здана в дослідну експлуатацію наприкінці 1994 року. Спочатку вона складалася з чотирьох каналів контролю і вторинної вимірювальної апаратури. 1995 року кількість каналів контролю ЩПН і ПЕД збільшили ще на шістнадцять. Додаткові канали







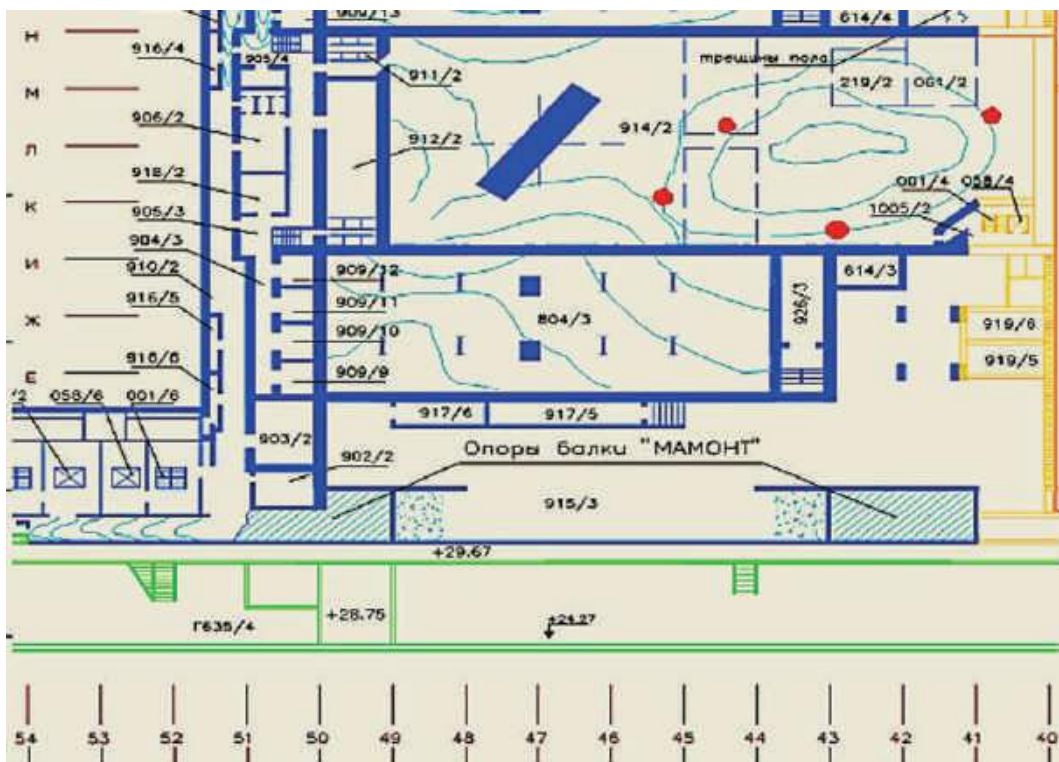


Рис. 2.34 — Схема рекомендованого розміщення детекторів моніторингу ЛПВМ у центральному залі

в ЦЗ встановили через технологічні люки покрівлі об'єкта «Укриття». 2000 року систему перевели в режим штатної експлуатації. На сьогодні ТСМ «Сигнал» знята з експлуатації, а на зміну розрізненим системам контролю прийшла єдина система моніторингу об'єкта — інтегрована система контролю.

Система контролю ядерної безпеки (СКЯБ), яка містить 19 каналів контролю ЩПН та ПЕД, була введена в експлуатацію 2018 року (рис. 2.32). На сьогодні моніторинг нейтронної активності на периферії «південного» скупчення СМР в прим. 305/2 здійснюється в трьох точках детектування щільності потоку нейтронів. Блоки детектування СКЯБ розташовані на периферії «південного» скупчення з підвищеною концентрацією СМР (щонайменше на відстані 2,5 м від епіцентру), відповідно їх ефективність та інформативність невисокі. Нині скупчення в ЦЗ фактично не контролюються. Блоки детектування СКЯБ встановлені в проходках під нижнім перекриттям ЦЗ і через ослаблення відгуку більше

---

---

ніж у 100 разів є неінформативними. Схожа ситуація і з «північним» скупченням СМР (прим. 305/2).

Отже, сучасне розміщення 19 точок детектування нейтронів СКЯБ не забезпечує достатнього рівня ядерної безпеки НБК, оскільки не забезпечує ефективного моніторингу нейтронної активності потенційно ядерно небезпечних скупчень у центральному залі, південному басейні витримки і прим. 305/2 [67]. Окрім того, в проєкті СКЯБ не передбачався контроль температури, тому в ІПБ АЕС 2018 року була розроблена та впроваджена на Чорнобильській АЕС експертно-дослідницька система, яка містить 19 каналів температури та п'ять додаткових каналів ЩПН. Оскільки в СКЯБ більшість точок детектування є малоінформативними, для підвищення рівня ефективності систему треба скоригувати: вивести з експлуатації неінформативні нейтронні вимірювальні канали, а обладнання (канали № 12, № 15 з реакторного простору; блоки детектування № 13 і № 14 з південно-західного квадранта прим. 305/2; блоки детектування № 17, № 18 і № 19 з проходок під ЦЗ) використати для інформативніших точок контролю (рис. 2.33).

Схему розміщення точок детектування і маршрути доступу до них у зонах розміщення потенційно ядерно небезпечних скупчень ПБМ в центральному залі, яка зможе забезпечити моніторинг стану підкритичності, наведено на рис. 2.34 [68]. У кожній точці детектування розміщено по одному блоку детектування нейтронів. Оптимальними маршрутами доставки детекторів у точки детектування є проходки в трубному накаті покрівлі. Доставка детекторів у нижні перекриття можлива через свердловину з прим. 515/3.

Моніторинг нейтронної активності на периферії «північного» скупчення з підвищеною концентрацією ядерно небезпечних подільних матеріалів можливий після установки нейтронних детекторів ЕДС (енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії) в прим. 305/2.

## **2.5 Оцінка наявних бар'єрів безпеки та ефективності оперативного контролю підкритичності скупчень ядерно небезпечних подільних матеріалів**

У чинному «Технологічному регламенті...» [49] зазначається, що гарантом безпеки об'єкта «Укриття» є наявна система бар'єрів (сформованих природно або створених у процесі ліквідації запроєктної аварії) на шляху поширення радіоактивних продуктів та іонізуючого випромінювання, а також цілеспрямована діяльність персоналу в процесі експлуатації. Система фізичних бар'єрів охоплює: будівельні конструкції четвертого енергоблока (насамперед стіни і перекриття приміщень, всередині яких є ПБМ); будівельні конструкції НБК; ПМВ, чий механічні властивості утримують їх у вигляді окремих локальних скупчень. Крім того, як бар'єри, що унеможливають ймовірність виникнення СЛР, вказано: нейтронно-фізичні характеристики

---

---

і геометричні параметри скупчень ПВМ (наприклад, некомпактність розташування скупчень СМР), за яких у звичайних умовах утворення критичних мас нездійсненне; відсутність води в скупченнях ПВМ; наявність поглиначів нейтронів у зоні локалізації скупчень СМР; неможливість утримання води в об'ємі скупчень ПВМ.

Результати комплексного аналізу доступних даних і результатів експериментально-розрахункових досліджень потенційно ядерно небезпечних скупчень ЛПВМ в об'єкті «Укриття» показали недостатність обґрунтування нинішніх бар'єрів безпеки. По-перше, не виконано розрахунки міцності конструкцій як об'єкта «Укриття», так і НБК у разі виникнення СЛР. По-друге, твердження відносно властивостей самих скупчень ЛПВМ, які унеможливають утворення критичних мас, ґрунтується на розрахунках, в яких концентрація ядерно небезпечних подільних матеріалів у ЛПВМ не перевищувала 18 %, що відповідало результатам, отриманим для зразків, відібраних на периферії скупчень СМР. Проте в епіцентрі концентрація СМР може бути більшою. Крім того, в Технологічному регламенті щодо прим. 305/2 зазначено, що середня концентрація СМР в ньому становить близько 26 %. З урахуванням цього факту і результатів температурних вимірів, які вказують на два осередки підвищеної концентрації подільних матеріалів, потрібен перегляд або верифікація наявних бар'єрів безпеки.

Ядерна безпека об'єкта «Укриття» забезпечується регламентним оперативним контролем ПВМ у підкритичному стані через введення розчинів матеріалів, поглинаючих нейтрони (НПМ) [49, 69—73]. Розчин НПМ (0,1 % розчин азотнокислого гадолінію) подається:

системою подачі розчину гадолінію (СПРГ), яка призначена для зменшення  $K_{\text{ef}}$  в скупченнях ПВМ у «розвалі» шахти реактора четвертого енергоблока Чорнобильської АЕС;

модернізованою системою пилопригнічення (МСПП), за допомогою якої у разі непрацездатності СПРГ або перевищення критичних рівнів зменшується значення  $K_{\text{ef}}$  розпиленням НПМ на поверхні скупчень, що містяться в ЦЗ;

установкою «Система оперативного введення водного розчину гадолінію» (далі — система введення гадолінію), яка призначена для зменшення  $K_{\text{ef}}$  в скупченнях ПВМ у прим. 305/2. Подача близько 40 л розчину гадолінію від установки здійснюється через напірний трубопровід, прокладений в обсадній трубі резервної свердловини. Розташування форсунки уможливило введення НПМ у південно-східний сектор прим. 305/2.

За достатньої періодичності роботи цих систем у 2004—2009 роках [70] вміст гадолінію в розчинних і колоїдних формах становив 0,2—1,6 г/м<sup>3</sup>, а у вигляді твердої фази досягав 10 г/м<sup>3</sup> при початковій концентрації в промивальному розчині близько 1000 г/м<sup>3</sup>. За результатами вимірів 2005 року дійшли висновку, що «... гадоліній накопичується в приміщенні 305/2 в результаті осадження...» [74]. Проте останнім часом



кількість сеансів роботи МСПП значно зменшилась, і за результатами нових експериментальних досліджень [75] концентрація гадолінію у воді деяких свердловин зазвичай не перевищувала 1 мг/л, що практично не впливає на рівень підкритичності розмножувальної системи.

Короткочасне підвищення концентрації від 2 до 5 мг/л пов'язане з проведенням сеансів пилопригнічення (рис. 2.35), але і такої концентрації НПМ недостатньо, адже концентрація гадолінію в зоні локалізації скупчення СМР аж на три порядки нижча за гранично необхідну для ефективного контролю рівня підкритичності цього скупчення. Отже, зараз на об'єкті «Укриття» треба підвищувати ефективність оперативного контролю рівня підкритичності скупчень СМР у прим. 305/2.

Робота систем СПРГ і МСПП впливає на рівень підкритичності скупчень СМР на нижніх позначках об'єкта «Укриття» дуже інерційно, адже подача розчину НПМ передбачена в простір шахти реактора зверху. На шляху таких водних потоків існує каскад басейнів, що впливає на інерційність надходження розчинів до зони локалізації ЯНДМ і визначає мінімально необхідний об'єм розчину НПМ.

Оскільки доступу безпосередньо до епіцентру ядерно небезпечних скупчень ЛПВМ нема, ефективність системи введення гадолінію для впливу на рівень підкритичності скупчень СМР у прим. 305/2 недостатня, оскільки система подає розчин НПМ лише на ближню периферію скупчень (рис. 2.36).

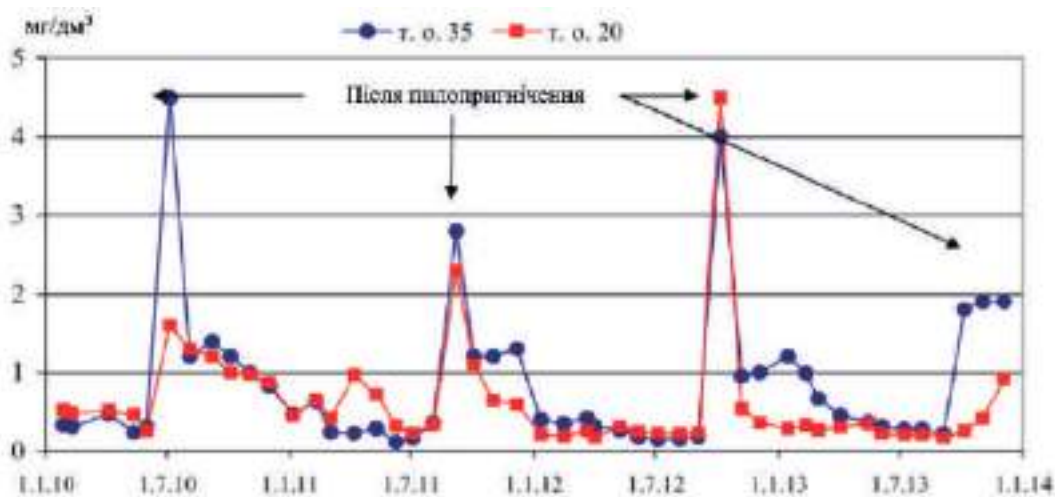


Рис. 2.35 — Концентрації гадолінію в зоні локалізації скупчень СМР після роботи системи МСПП [41, 76]

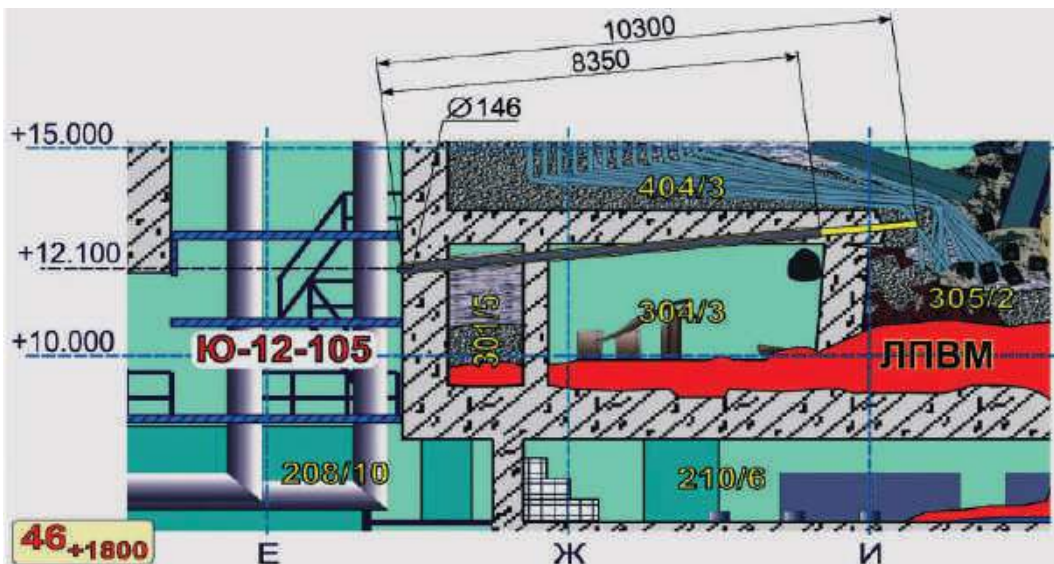


Рис. 2.36 — Схема введення гадолінію для впливу на рівень підкритичності скупчень СМР у прим. 305/2 (свердловина Ю-12-105)

Об'єми і швидкість подачі поглинача мають бути оцінені розрахунково-експериментальними методами індивідуально для кожного конкретного маршруту і способу доставки. За оцінками, стан готовності технологічної системи пригнічення орієнтовно має визначатися трьома годинами, якщо швидкість введення реактивності в разі розвитку підкритичної аномалії не перевищує  $10^{-4}$   $\beta/s$ , і максимум 20 хвилинами, якщо швидкість введення реактивності  $10^{-3}$   $\beta/s$  [77]. З урахуванням цих критеріїв потрібні додаткові дослідження систем введення гадолінію.

Ефективність МСПП або СПРГ як систем впливу на підкритичність ядерно небезпечних скупчень ЛПВМ у прим. 305/2 незначна також через великий час доставки НПР. Наприклад, якщо до встановлення НБК реакція вимірювальних каналів ЩПН на значне надходження води внаслідок рясних опадів була через п'ять-шість годин [41], то, зважаючи на поточне висихання в умовах НБК каскаду водних скупчень, НПР досягнуть зони локалізації СМР не раніше, ніж через десять годин. До того ж знадобиться експериментально оцінити мінімальний об'єм розчину, потрібного для заповнення всього каскаду басейнів. За попередніми оцінками, для відновлення водного режиму «південного» скупчення СМР, що забезпечуватиме його підкритичність, треба подати через західні свердловини безпосередньо до зони локалізації цих ЛПВМ близько 3—4 т води, створивши нову систему трубопроводів та насосної системи. У разі застосування штатних систем МСПП і СПРГ треба подати не менше ніж 50 т води.

## 2.6 Поточний стан ядерної безпеки об'єкта «Укриття»

Аналіз результатів експериментальних робіт [78] показав, що скупчення СМР у прим. 305/2 являє собою двошарову пористу структуру: верхній шар — чорні та коричневі ЛПВМ, нижній шар — потенційно критична композиція з високою концентрацією СМР (рис. 2.37).

До введення НБК в експлуатацію ЛПВМ були повністю перезволожені, і динаміка ЩПН утримувалася в межах сезонних трендів регулярним надходженням вологи від атмосферних опадів і конденсату. Сезонні відхилення не перевищували 10 % середньорічних значень; вони не є інформативно значущими в процесі контролю небезпечних змін рівня підкритичності СМР.

Після встановлення НБК і введення його в промислово-дослідну експлуатацію відбулися значні зміни волого-температурного режиму. Внаслідок відсутності надходження атмосферних опадів в об'єкті «Укриття» розпочався процес випаровування і втрати вологи пористою структурою ЛПВМ.

Значні зміни відбулися і в динаміці температури в приміщеннях об'єкта «Укриття». За результатами моніторингу температура в усіх контрольованих місцях зросла

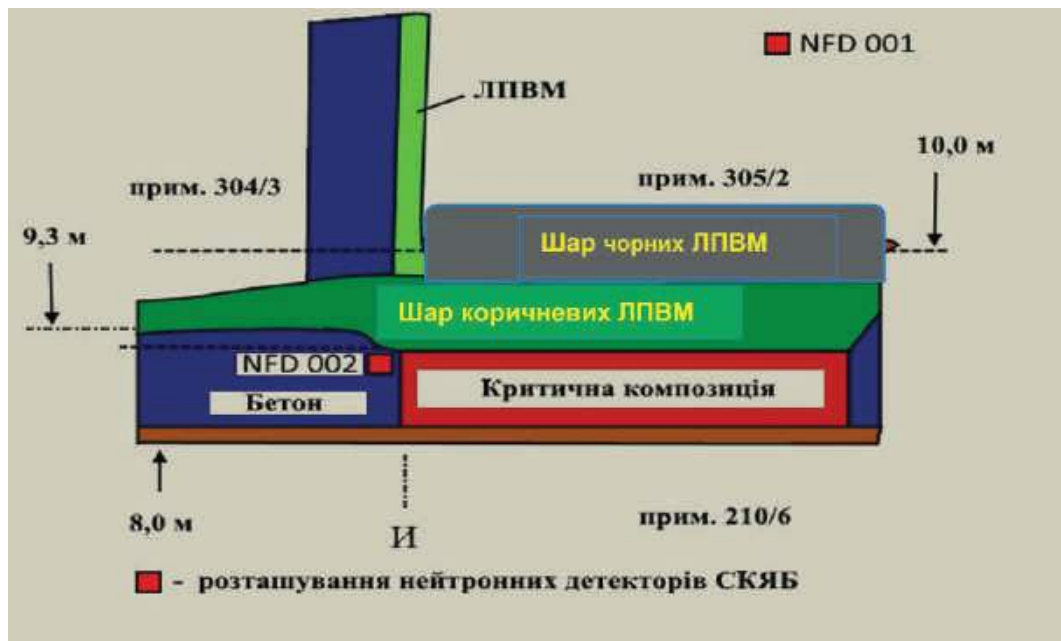


Рис. 2.37 — Модель потенційно ядерно небезпечного скупчення ПВМ у прим. 305/2

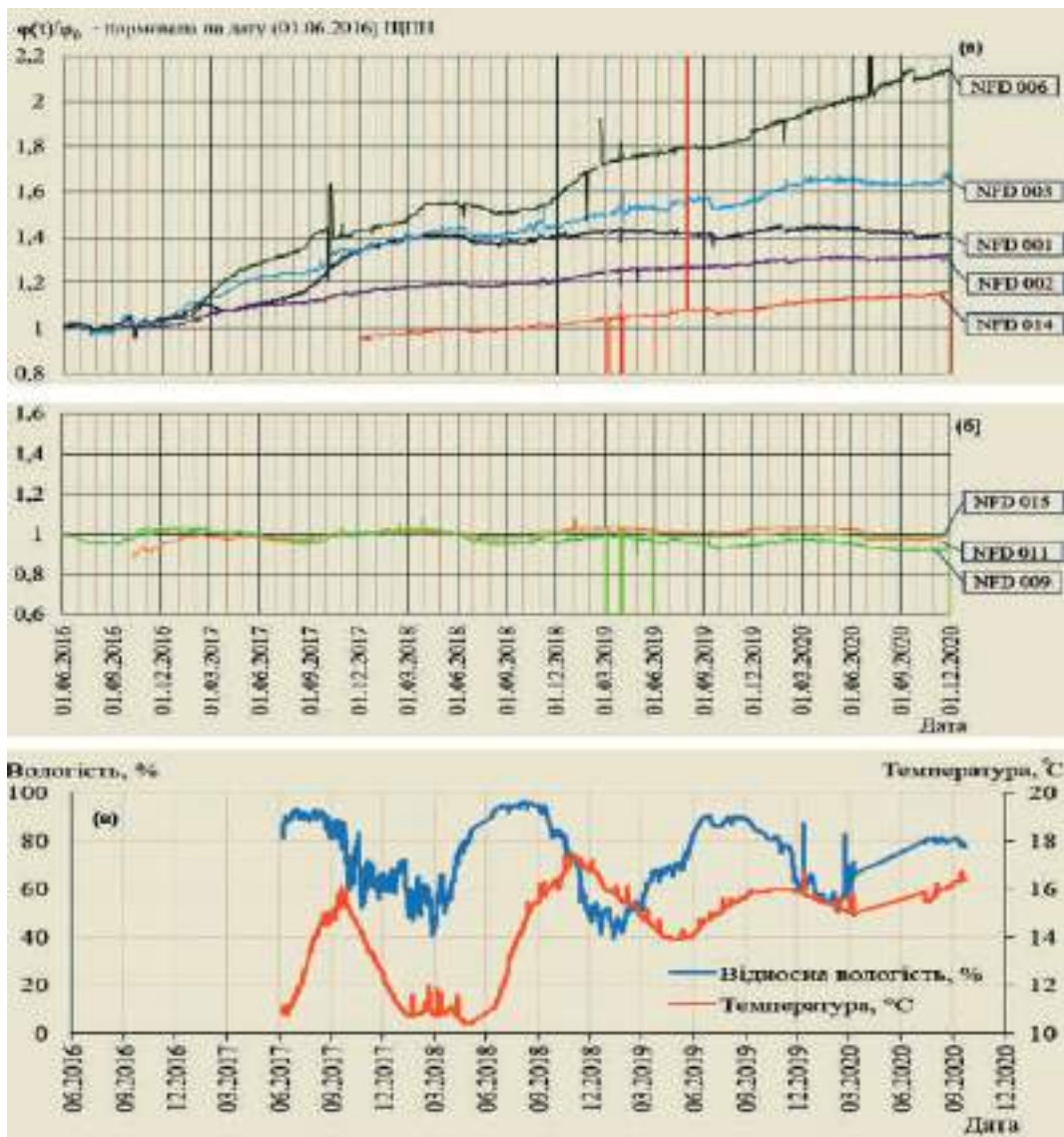


Рис. 2.38 — Динаміка щільності потоку нейтронів в прим. 305/2 та волого-температурний режим на нижніх позначках об'єкта «Укриття» в прим. 210/7:

- а — ЩПН поблизу ядерно небезпечного скупчення в прим. 305/2 об'єкта «Укриття»;
- б — ЩПН на віддаленій периферії; в — температура та вологість на нижніх позначках об'єкта «Укриття» в прим. 210/7



---

---

2018 року приблизно на  $1\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{C}$  і відставала від зростання температури довкілля приблизно на  $5\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На периферії скупчень ЛПВМ у прим. 305/2 і 304/3 вона лежала в межах  $19\text{--}23\text{ }^{\circ}\text{C}$  за температури зовнішнього середовища близько  $+2\text{...}12\text{ }^{\circ}\text{C}$  вдень. Помітні зміни характерні й стосовно вологи. Якщо до насування НБК період утворення конденсату в зазначених приміщеннях починався в травні, а закінчувався у вересні, то 2018 року період утворення конденсату розпочався наприкінці вересня — на початку жовтня. На 31.10.2018 інтенсивність утворення конденсату була істотною, підлога та стіни приміщень басейну-барботера і паророзподільного коридору — досить зволженими.

Динаміку ЩПН на периферії скупчень з підвищеною концентрацією СМР у прим. 305/2 за 2016—2020 роки наведено на рис. 2.38. Результати досліджень показали, що сезонні тренди щільності в динаміці потоку нейтронів спостерігаються тільки в точках детектування, розміщених на поверхні скупчень, оскільки визначаються періодами появи (конденсація) і втрати (випаровування) екрануючого шару водного відбивача і повністю відповідають волого-температурному режиму в НБК.

Статистична обробка даних ЩПН показала, що коефіцієнти кореляції в цих точках детектування становлять понад 0,8, а зростання нейтронної активності визначається нейтронами вимушеного поділу, тобто зростанням  $K_{\text{ef}}$ . На відміну від ядерно небезпечних скупчень ЛПВМ, на периферії та в явно підкритичних скупченнях значення щільності потоку нейтронів лежать на одному і тому ж рівні (рис. 2.38, б).

Інша картина спостерігається в «південному» скупченні прим. 305/2 з підвищеною концентрацією подільних матеріалів. Через зміну режиму вологості зростає нейтронна активність скупчення (рис. 2.38, а). Згідно з отриманими даними щодо динаміки параметрів на периферії скупчення ЛПВМ, розрахунками його структури, геометрії, а також відповідно до даних спостереження ЩПН зроблено прогноз щодо подальшого зростання нейтронної активності, зумовленого втратою вологи в шарі перезволоженого середовища чорних ЛПВМ (загальним об'ємом до  $54\text{ м}^3$ ) і зростанням  $K_{\text{ef}}$ .

Зростання ЩПН триватиме до моменту досягнення оптимальної концентрації води з максимальним  $K_{\text{ef}}$  в шарі чорних ЛПВМ. Далі нейтронна активність падатиме до повного зневоднення цього верхнього шару. Також при допущенні, що критична композиція ЛПВМ утримуватиме вологу до повного висихання шару ЛПВМ (без урахування капілярного ефекту), час до початку процесу втрати води критичної композицією становитиме приблизно 700 діб. Початок процесу втрати вологи можна визначити за зміною градієнтів ЩПН в точках детектування в південно-східному квадраті. Критеріями експертної оцінки рівня підкритичності є швидкість і кратність наростання ЩПН.

---

## 2.7 Рекомендації щодо унеможливлення виникнення неконтрольованої самопідтримуючої ланцюгової реакції

Ефективність забезпечення ядерної безпеки НБК залежить від таких умов: наявності надійних експериментально-розрахункових даних, які гарантовано унеможливають ймовірність виникнення СЛР;

здатності організаційно-технічних засобів забезпечити ефективний оперативний контроль рівня підкритичності всіх скупчень СМР (за умови наявності ефективного оперативного нейтронного моніторингу);

реалізації засобів превентивного пригнічення параметрів критичності скупчень СМР (впровадження заходів, що виключають умови, необхідні для виникнення СЛР).

Для скупчень СМР в прим. 305/2 перші дві умови забезпечення ядерної безпеки неприйнятні: доступні експериментально-розрахункові дані не тільки не виключають ймовірність виникнення СЛР, а навпаки, опосередковано підтверджують такий ризик; на поточний момент відсутні засоби ефективного оперативного впливу на рівень підкритичності скупчень з підвищеною концентрацією СМР; ті маршрути доступу, які є зараз, можуть забезпечити оперативний контроль рівня підкритичності (з гарантією раннього виявлення аномалій при  $K_{\text{ef}} < 0,95$ ) скупчень СМР лише за наявності надійних індивідуальних кількісних і якісних критеріїв раннього виявлення аномалій в показаннях детекторів, що можуть бути ідентифіковані як небезпечні зміни  $K_{\text{ef}}$ .

Розроблено алгоритм ранньої ідентифікації небезпечних змін рівня підкритичності [79], який у разі його застосування в програмному забезпеченні СКЯБ та впровадження запропонованих рекомендацій щодо коригування схеми точок моніторингу СКЯБ дасть змогу реалізувати другу умову забезпечення ядерної безпеки.

На сьогодні завдання ефективного забезпечення ядерної безпеки скупчень СМР загалом зводиться до реалізації принципу унеможливлення виникнення СЛР. Для скупчень СМР, локалізованих у прим. 305/2, особливої актуальності набуває третя умова — реалізація засобів превентивного пригнічення параметрів критичності.

Передусім треба визначити просторовий розподіл і концентрацію НПМ, щоб гарантувати неперевищення безпечного рівня  $K_{\text{ef}} < 0,95$  за будь-якої передбачуваної зміни стану скупчення СМР. Так само важливо визначити та забезпечити ефективні маршрути доставки НПМ безпосередньо до скупчень СМР і експериментально оцінити часові характеристики процесів надходження поглиначів нейтронів у розмножувальне середовище, а також тривалість утримання необхідної концентрації. З цієї метою виконано такі роботи:

збір та аналіз наявних експериментальних даних для створення просторової та фізико-хімічної моделі ядерно небезпечних скупчень ПВМ;

---

---

аналіз модельних розрахунків впливу нейтронних поглиначів на зменшення ймовірності критичного інциденту;

підготовка технологічних рекомендацій (зокрема рішень щодо введення нейтронних поглиначів у скупчення СМР) із запобігання виникненню критичних інцидентів на всіх етапах подальшого перетворення НБК.

Вимоги до технологічного процесу пригнічення параметрів критичності (виключення ймовірності виникнення СЛР) можна сформулювати так:

основою запропонованих рішень мають бути освоєні на об'єкті «Укриття» технології, мінімально можливі фінансові витрати і мінімальна колективна доза опромінення персоналу, який виконує роботи;

втління рішень щодо введення нейтронних поглиначів у скупчення СМР в умовах об'єкта «Укриття» має ефективно контролюватися, щоб мінімізувати кількість РАВ;

такі рішення не повинні призводити до зниження стійкості конструкцій, мають забезпечити гарантовану стабілізацію стану ЛПВМ (забезпечити ядерну безпеку ПВМ в нормальних і аварійних режимах) і передбачати можливість подальшого демонтажу конструкцій об'єкта «Укриття».

Зважаючи на ці вимоги, визначено прийнятні в умовах НБК технічні рішення з унеможливлення ризиків виникнення СЛР:

введення рідких НПМ у скупчення СМР;

кероване зменшення концентрації сповільнювача (води) в зоні локалізації скупчення СМР у разі гарантованого унеможливлення доступу води на підреакторну плиту;

введення твердих НПМ.

Гарантованим способом превентивного пригнічення параметрів критичності є введення в об'єм скупчення твердих НПМ. Проте технологію (спосіб) доставки НПМ треба визначати індивідуально для кожного скупчення СМР. Дослідження можливості застосування НПМ показали, що вони можуть вводитися у вигляді спеціальних мас (наприклад, стрижнів, які проходять через пробурені свердловини) або як спеціальні розчини, що гарантовано просочують об'єм ЛПВМ, щоб за будь-яких початкових подій домогтися прийнятного рівня ризику. Як поглинаючі матеріали розглядали бор (штатні стрижні аварійного захисту РБМК), кадмій, європій і гадоліній.

Ефективність оперативного контролю нейтронної аномалії сильно залежить від маршрутів доставки поглиначів, які мають забезпечувати розміщення НПМ безпосередньо в середовищі подільних матеріалів. За нинішніми маршрутами, НПМ потрапляють тільки на доступну периферію скупчення СМР, тобто на границю розділу «детектор — джерело», і в такому разі процес придушення нейтронної аномалії імітується (регламентна СКЯБ реєструє хибне зниження ЩПН), тобто не відповідає дійсності. Аналогічна ситуація сталася при нейтронному інциденті 1990 року.

---

---

Отже, після встановлення НБК у проектне положення відбувається вплив волого-температурного режиму на стан ЛПВМ. За результатами експериментальних та розрахунково-модельних досліджень виконана переоцінки рівня ядерної безпеки всіх скупчень СМР: встановлено епіцентр, зону локалізації потенційно ядерно небезпечних скупчень ПВМ, оцінено їх масу і об'єм, склад та структуру, а також ймовірність існування критичних композицій.

Через невизначеність і непередбачуваність механізмів зневоднення скупчень СМР першорядним обов'язковим завданням є реалізація ефективного локального (на доступній периферії скупчень СМР) моніторингу нейтронної активності, а також впровадження в програмне забезпечення СКЯБ експертної процедури ідентифікації небезпечних змін підкритичності.



---

## **Розділ 3. РАДІАЦІЙНА БЕЗПЕКА**

Усі ядерні та радіоактивні матеріали об'єкта «Укриття» є радіоактивними відходами і в майбутньому мають бути вилучені з нього для захоронення. Фізичні й хімічні характеристики РАВ істотно різняться залежно від їх походження. Об'єкт «Укриття» представлений практично всім спектром РАВ, причому значна їх частина належить до високоактивних. Радіоактивність матеріалів в об'єкті визначається активністю радіонуклідів, що виникли або внаслідок активації нейтронами в активній зоні реактора зруйнованого енергоблока, або через поверхневе забруднення матеріалів радіоактивними речовинами.

В об'єкті «Укриття» міститься значна кількість дрібнодиспергованого палива як результат фізико-хімічного впливу на ПВМ під час аварії та після неї. Паливний пил становить небезпеку внутрішнього опромінення людини й поширення радіоактивних речовин поза межами дислокації. У післяаварійний період з'являється вторинний паливний пил через руйнування ЛПВМ. Крім паливного пилу в об'єкті є значна кількість пилу, утворення якого пов'язане з деградацією будівельних конструкцій і руйнуванням сухих пилопригнічувальних покриттів під впливом старіння й кліматичних факторів. Оскільки названі конструкції та пилопригнічувальні покриття забруднені радіонуклідами, цей пил найчастіше є радіоактивним.

Під час активної стадії аварії більша частина графітової кладки вигоріла й була розсіяна радіоактивним викидом, а інша частина — викинута в реакторний зал, на територію майданчика, покрівлі енергоблока. Частина графіту диспергована внаслідок вибуху й розподілена у вигляді пилу по приміщеннях реакторного відділення.

Основний об'єм РАВ об'єкта «Укриття» становлять різні види будівельних матеріалів, радіонуклідний склад поверхневого забруднення яких характеризується наявністю  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239-240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  і  $^{60}\text{Co}$ . Ступінь забруднення бетону та будівельних конструкцій варіюється в широкому діапазоні. Основним потенційним джерелом металевих відходів, що утворюватимуться в процесі демонтажу, є трубопроводи, вентиляційні короби й інше технологічне обладнання енергоблока. Матеріали, використані на активній стадії ліквідації аварії для засипання шахти реактора, також є значною частиною РАВ.

---

---

Одним з головних чинників небезпеки на об'єкті «Укриття» є наявність радіоактивної води, яка впливає на стан радіаційної безпеки, а взаємодіючи з ПВМ, розчиняє і переносить радіонукліди, які можуть потрапити в довкілля. Частина активності концентрується в мулистих відкладеннях і, висихаючи, несе загрозу як джерело аерозолів.

### **3.1 Зміна полів гамма-випромінювання після встановлення нового безпечного конфайнмента у проектне положення**

Вимір потужності дози та кутового розподілу інтенсивності  $\gamma$ -випромінювання в окремих зонах проведено 2016 року до і після встановлення НБК у проектне положення [80]. Потужність дози (ПД) виміряли радіометром-дозиметром МКС-07 «Пошук» (рис. 3.1), а кутові розподіли інтенсивності  $\gamma$ -випромінювання — за допомогою пристрою ШД-1 [81] та установки «Екран» (рис. 3.2 і 3.3). Це обладнання було раніше випробуване й неодноразово використане на етапі передпроектних досліджень та під час реалізації низки проектів на майданчику Чорнобильської АЕС, як-от:

- стабілізація будівельних конструкцій об'єкта Укриття;
- будівництво нової вентиляційної труби другої черги Чорнобильської АЕС;
- остаточне закриття і консервація першого — третього енергоблоків Чорнобильської АЕС;
- реконструкція головного корпусу Чорнобильської АЕС з підсиленням і герметизацією будівельних конструкцій, які виконують функції огорожувального контуру НБК;
- відновлення огорожувального контуру машинного залу четвертого енергоблока Чорнобильської АЕС;
- реконструкція частини машинного залу Чорнобильської АЕС для створення сховища високоактивних відходів.

Місця досліджень вибирали зважаючи на розташування зон виконання майбутнього демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» і подальшого поводження з ними, а також враховуючи: мінімальну відстань до основних джерел  $\gamma$ -випромінювання об'єкта «Укриття»; мінімально можливу відстань від місця встановлення пристрою ШД-1 до конструкцій НБК з метою максимальної реєстрації зворотного  $\gamma$ -розсіювання; наявність доступу до місць дослідження до та після встановлення НБК у проектне положення.

Виходячи з цього було обрано чотири зони досліджень, які показано на рис. 3.4.

Результати вимірів потужності дози за допомогою МКС-07 «Пошук» для зон 1—4 до та після встановлення НБК у проектне положення наведено в табл. 3.1. Порівнюючи дані в усіх точках зон досліджень, бачимо зниження величини ПД після встановлення НБК у проектне положення від 1,8 % (точка 2) до 53,8% (точка 7Е) від початкового значення (до встановлення НБК у проектне положення).



Рис. 3.1 — Радіометр-дозиметр  
МКС-07 «Пошук»  
з блоком детектування БДБГ-07

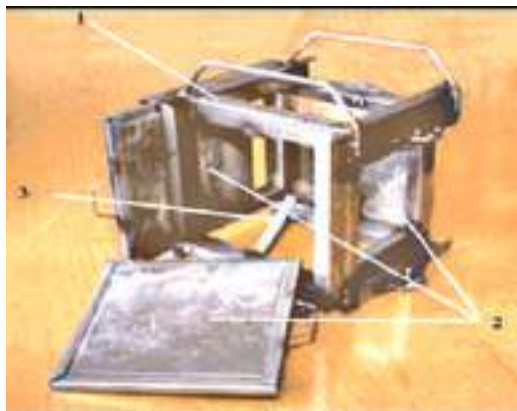


Рис. 3.2 — Установка «Екран»:  
1 — корпус установки; 2 — свинцеві екрани;  
3 — кронштейн для кріплення детектора

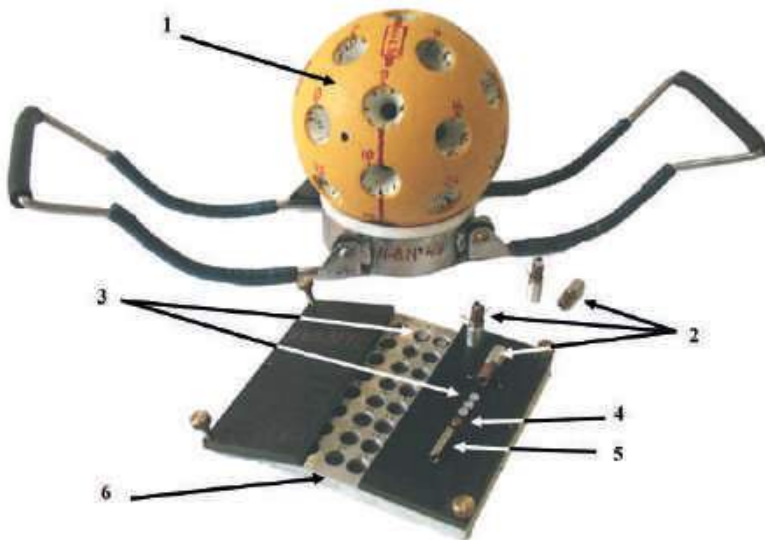


Рис. 3.3 — Пристрій ШД-1:  
1 — свинцевий корпус із колімованими отворами; 2 — капсули з детекторами;  
3 — термолюмінесцентні детектори; 4 — мідні фільтри; 5 — фіксатори;  
6 — пенал для транспортування детекторів

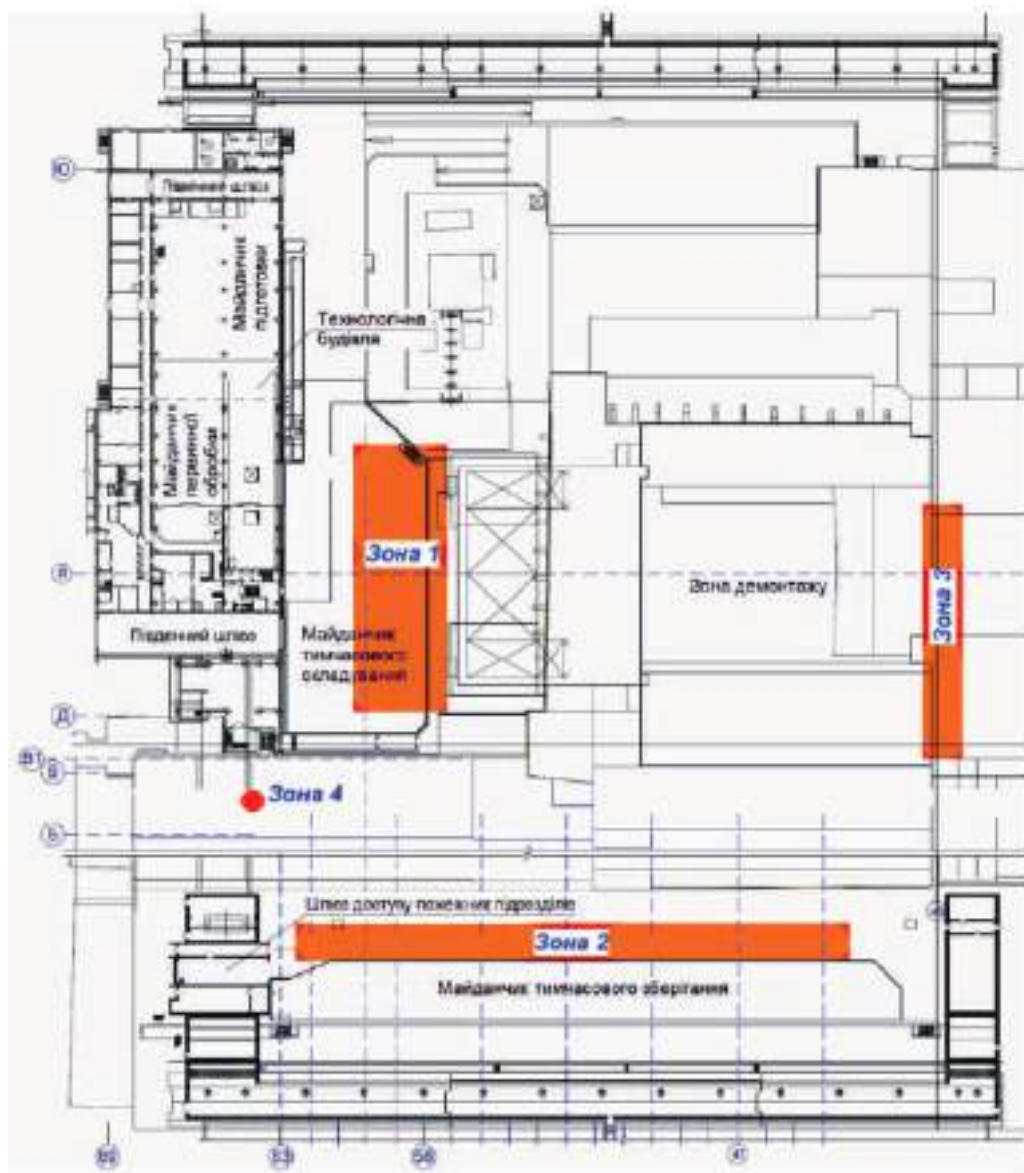


Рис. 3.4 — Зони досліджень:

- 1 — локальна зона об'єкта «Укриття», майданчик тимчасового складування;
- 2 — локальна зона об'єкта «Укриття», майданчик тимчасового зберігання;
- 3 — покриття блока В; 4 — покриття деаераторної етажерки



Таблиця 3.1 — Потужність дози  $\gamma$ -випромінювання в зонах 1—4

№ зони	№ точки	Координати точки виміру	ПД, мкЗв/год		Відхилення від початкового значення, %
			до встановлення арки	після встановлення арки	
1	1	Г/58–3	237	202	–14,8
	2	М/58–3	34	33,4	–1,8
	3	Н/58–3	21	14,0	–33,3
	4	П/58–3	11,5	7,1	–38,3
	5	Р–2/58–3	8,5	5,6	–34,1
	6	Е/58–0,5	35,5	26,4	–25,6
	7	Ж/58–0,5	38	23,7	–37,6
	8	И/58–0,5	26	22,7	–12,7
	9	К/58–0,5	21,4	16,0	–25,2
	10	Л/58–0,5	21	17,6	–16,2
	11	М/58–0,5	20	14,8	–26,0
	12	Н/58–0,5	21,5	13,4	–37,7
	13	П/58–0,5	19,4	14,8	–23,7
2	1Е	А–15/44	45,2	32,6	–27,9
	2Е	А–15/47	82,8	65,2	–21,3
	3Е	А–15/50	105	87,3	–16,9
	4Е	А–15/53	117	92,8	–20,7
	5Е	А–15/56	79,9	78,1	–2,3
	6Е	А–15/59	63,8	50,6	–20,7
	7Е	А–15/62	50,9	23,5	–53,8
1	8Е	Е/60	99,2	68,1	–31,4
	9Е	Ж/60	84,4	65,0	–23,0
	10Е	И/60	63,2	61,2	–3,2
	11Е	К/60	69,3	62,0	–10,5
	12Е	Л/60	62,7	52,5	–16,3
	13Е	М/60	53,8	43,9	–18,4
	14Е	Н/60	50,0	40,4	–19,2
	15Е	П/60	42,3	39,6	–6,4
	16Е	Р/60	40,0	32,4	–19,0
4	1Ш	Б+7/64, позначка 42,800	280	255	–8,9
3	2Ш	И+1./40+1, позначка 74,500	2370	2280	–3,8
	3Ш	Г+1/40, позначка 71,200	460	450	–2,2
	4Ш	Н–1/ 40+1, позначка 74,500	1900	1700	–10,5

Визначаючи потужність дози установкою «Екран» у зонах 1 і 2 (рис. 3.5), детектор розміщували у свинцевому контейнері з одним відкритим боком, спрямованим вгору, а всі інші напрямки були екрановані. Мета досліджень — оцінити ефект зворотного розсіювання  $\gamma$ -випромінювання на конструкціях НБК. Результати обстеження (табл. 3.2) показали, що після установки НБК у проєктне положення потужність дози, яка формується з верхнього напрямку, у точках зони 1 зросла, а в точках зони 2, навпаки, зменшилась (рис. 3.6). Це можна пояснити так. У зоні 1 установку «Екран» розміщували на майданчику поблизу реакторного блока. Тому пряме  $\gamma$ -випромінювання від основних джерел центрального залу четвертого енергоблока після розсіювання від конструкцій НБК потрапляло на детектор, розміщений в установці, що, відповідно, збільшувало внесок складової від напрямку «вгору» (див. рис. 3.6, а). У зоні 2 пряме випромінювання від джерел випромінювання, які розташовані у центральному залі, відсутнє, тому що між зоною дослідження та центральним залом є конструкції деаераторної етажерки і машинного залу. В цій зоні зафіксовано зниження потужності дози від напрямку «вгору» (див. рис. 3.6, б).

**Таблиця 3.2 — Показання потужності дози установки «Екран» у точках вимірів, розташованих у зонах 1 і 2, мкЗв/год**

№ зони	№ точки, координати	До встановлення НБК	Після встановлення НБК в проєктне положення	Відхилення від початкового значення, % ( $\pm$ )
1	8Е, Е/60	29,9	33,5	+12,0
	9Е, Ж/60	31,0	30,6	+1,3
	10Е, И/60	24,4	25,2	+3,3
	11Е, К/60	20,5	25,3	+23,4
	12Е, Л/60	18,2	19,3	+6,0
	13Е, М/60	15,2	17,3	+13,8
	14Е, Н/60	15,1	17,4	+15,2
	15Е, П/60	10,9	15,6	+43,1
	16Е, Р/60	10,9	13,5	+23,9
2	1Е, А <sub>-15</sub> /44	15,8	13,2	-16,5
	2Е, А <sub>-15</sub> /47	31,8	21,1	-33,6
	3Е, А <sub>-15</sub> /50	34,4	31,2	-9,3
	4Е, А <sub>-15</sub> /53	34,4	31,1	-9,6
	5Е, А <sub>-15</sub> /56	24,7	24,9	-0,8
	6Е, А <sub>-15</sub> /59	20,2	15,7	-22,3
	7Е, А <sub>-15</sub> /62	13,8	9,1	-34,1

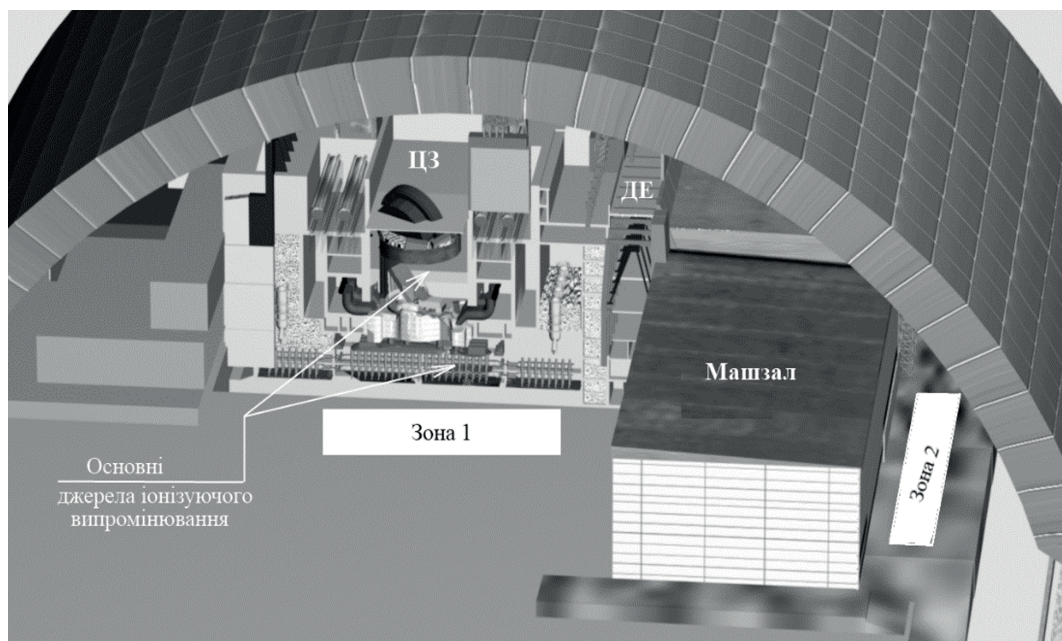


Рис. 3.5 — Місця вимірів потужності дози в зонах 1 і 2 за допомогою установки «Екран»

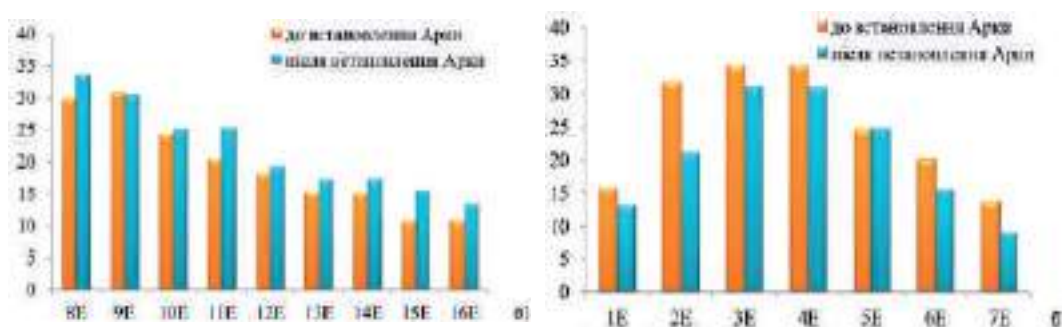


Рис. 3.6 — Дані вимірів установкою «Екран» від напрямку «вгору» до і після встановлення арки НБК, мкЗв/год:  
а — в точках зони 1; б — в точках зони 2

---

Дослідження кутових розподілів  $\gamma$ -випромінювання за допомогою пристрою ШД-1 істотних змін кутових розподілів у вибраних точках не виявило (рис. 3.7). Зазначимо, що спостерігається деяка тенденція до збільшення інтенсивності  $\gamma$ -випромінювання з верхнього напрямку при загальному зменшенні значень інтенсивності, однак таке збільшення лежить у межах похибки реєстрації в термolumінесцентних дозиметрах (ТЛД-500К) та потребує додаткового аналізу даних. Хоча точки досліджень обрані з мінімально можливою відстанню до поверхні нового безпечного конфайнмента (наприклад, у точці 4Ш відстань до конструкцій НБК лише 15 м), все одно залишається достатньо чинників, що впливають на здатність реєстрації ефекту зворотного розсіювання. Зокрема, ефект зворотного розсіювання, за різними припущеннями, становить не більше ніж 15 % величини потужності дози, а похибка ТЛД, яка зумовлена неоднорідністю в комплектах дозиметрів та енергетичною чутливістю, дорівнює  $\pm 30$  %.

Проведені дослідження засвідчили, що після встановлення НБК у проектне положення в усіх точках вимірів зафіксовано зниження ПД від 3 до 50 % залежно від зони обстеження.

Вивчення характеристик спектра  $\gamma$ -випромінювання в характерних зонах досліджень дасть змогу підвищити точність оцінки внеску зворотного розсіювання від будівельних конструкцій НБК до загальної величини ПД, а також точніше розрахувати передбачуване дозове навантаження на персонал, який виконуватиме демонтаж нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття», та моделювати біологічний захист. Ці дослідження треба виконати в рамках реалізації Програми науково-технічного супроводження на етапах введення в експлуатацію та експлуатації НБК [82].

Потужність еквівалентної дози  $\gamma$ -випромінювання у ближній зоні НБК вимірювали у 2017—2018 роках [83]. Мета досліджень, які проводилися з червня по вересень 2017 року, — оцінити ефективність протирадіаційного захисту після встановлення НБК у проектне положення, порівнявши результати потужності дози з результатами досліджень 2003—2004 років [84, 85].

Потужність дози вимірювали у трьох вертикальних площинах, розташованих на відстанях від західної контрфорсної стіни об'єкта «Укриття» в західному напрямку (рис. 3.8): площа 1 — на відстані 120 м; площа 2 — 265 м; площа 3 — 355 м. У кожній площині визначали ПД у дев'яти точках на висотах 30, 60 і 90 м над поверхнею землі. Всього проведено 27 висотних вимірів. При цьому використовували комплект з трьох електронних дозиметрів DMC 2000S і зчитувач LDM 2000 фірми MGPI, прилад МКС-07 «Пошук» з блоком детектування БДБГ-07 і безпілотний літальний апарат. Отримані результати наведено в табл. 3.3 і на рис. 3.9.



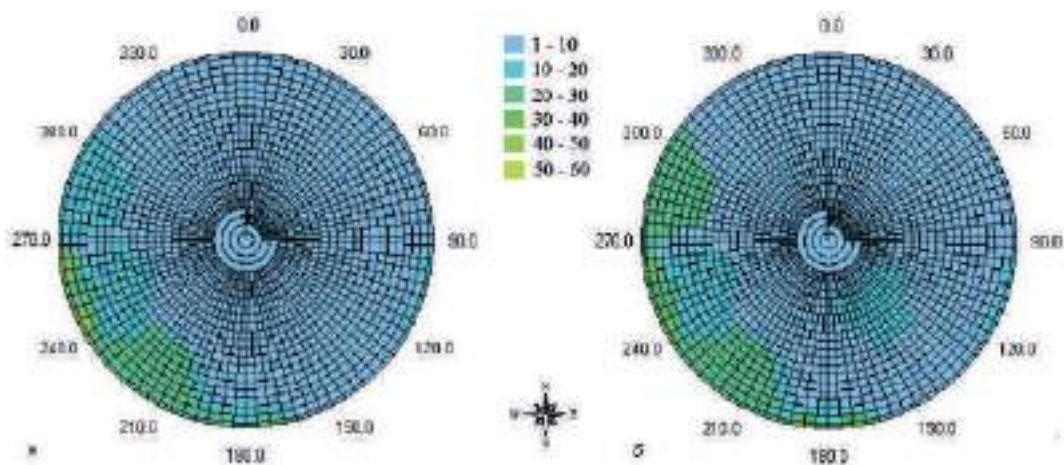


Рис. 3.7 — Картограма кутових розподілів інтенсивності  $\gamma$ -випромінювання з верхньої півсфери вимірів зони 3 в точці 4Ш:

*а* — до встановлення арки НБК,  $\text{мР} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{срад}^{-1}$ ; *б* — після встановлення арки НБК

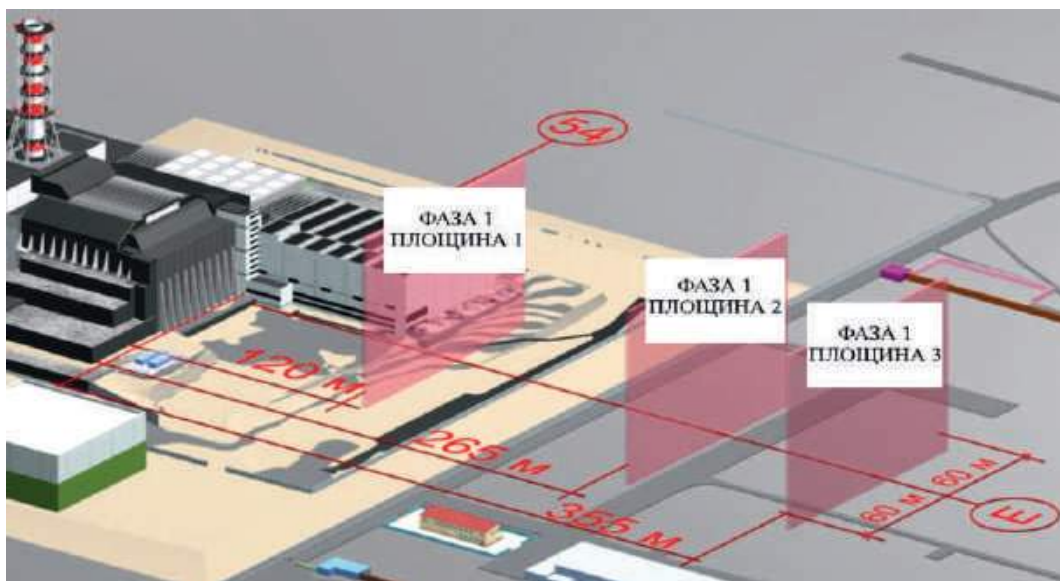


Рис. 3.8 — Зони проведення вимірів потужності еквівалентної дози, 2017 рік

**Таблиця 3.3 — Потужність дози у ближній зоні  
нового безпечного конфайнмента, 2017 рік**

№ кон- троль- ної точки	Координати контрольної точки	Висота контроль- ної точки, м	ПД, мкЗв/ч (дані ІПБ АЕС за 2003— 2004 рр.)	ПД, мкЗв/ч (дані ДСП ЧАЕС після насування арки НБК)	Кратність ослаблення ПД	Середня кратність ослаблення ПД
Площина 1						
1-1	ряд Р, вісь 73	30	126	8,6	14,7	9,9
1-2	ряд Г, вісь 73	30	197	45	4,4	
1-3	ряд А, вісь 73	30	290	30	9,7	
1-4	ряд Р, вісь 73	60	182	12	15,2	
1-5	ряд Г, вісь 73	60	320	60	5,3	
1-6	ряд А, вісь 73	60	506	51	9,9	
1-7	ряд Р, вісь 73	90	244	15	16,2	
1-8	ряд Г, вісь 73	90	421	72	5,8	
1-9	ряд А, вісь 73	90	482	60	8,0	
Площина 2						
2-1	ряд Р вісь 97	30	22	0,8	27,5	20,7
2-2	ряд Г, вісь 97	30	24	6,3	3,8	
2-3	ряд А, вісь 97	30	20	2,4	8,3	
2-4	ряд Р, вісь 97	60	22	1,7	12,9	
2-5	ряд Г, вісь 97	60	33	0,8	41,2	
2-6	ряд А, вісь 97	60	31	2,5	12,4	
2-7	ряд Р, вісь 97	90	34	2,1	16,2	
2-8	ряд Г, вісь 97	90	41	0,8	51,3	
2-9	ряд А, вісь 97	90	30	2,4	12,5	
Площина 3						
3-1	ряд Р, вісь 113	30	9	0,6	15	12,6
3-2	ряд Г, вісь 113	30	11	0,6	18,3	
3-3	ряд А, вісь 113	30	11	1,7	6,5	
3-4	ряд Р, вісь 113	60	11	0,6	18,3	
3-5	ряд Г, вісь 113	60	12	0,6	20	
3-6	ряд А, вісь 113	60	12	1,9	6,3	
3-7	ряд Р, вісь 113	90	13	0,8	16,3	
3-8	ряд Г, вісь 113	90	14	1,9	7,4	
3-9	ряд А, вісь 113	90	13	2,4	5,4	



---

У площині 2 кратність ослаблення ПД найбільша, оскільки ця площа лежить на значній відстані від об'єкта «Укриття», що зменшує вплив останнього, а дезактивація території сприяла суттєвому покращенню радіаційного стану, тобто зменшенню потужності дози.

Кратність ослаблення в площині 3 майже вдвічі менша, ніж у суміжній площині 2. Це можна пояснити впливом радіаційно забрудненої території, що безпосередньо примикає до майданчика будівництва НБК із західного боку.

17 квітня — 26 червня 2018 року продовжили вимірювати потужність дози на різних висотах навколо нового безпечного конфайнмента, застосували таке обладнання та інструменти:

- електронний радіодозиметр MiniTRACE-γ S100R;
- ShortLink. Модуль передачі радіосигналів;
- ShortLink. Приймач-блок EPC;
- програмне забезпечення DataEXPERT;
- прилад МКС-07 «Пошук» з блоком детектування БДБГ-07;
- безпілотний літальний апарат.

Виміри потужності дози виконано в чотирьох вертикальних площинах (рис. 3.10): площа 1 — на відстані 45 м із західного боку НБК; площа 2 — на відстані 10 м з південного боку НБК; площини 3 і 4 — на відстані 10 м та 120 м, відповідно, з північного боку НБК; в кожній площині — у дев'яти точках на висоті 30, 60 і 90 м над поверхнею землі, всього висотних вимірів — 36 (табл. 3.4, рис. 3.11).

За отриманими результатами виявлено ділянки з максимальними і мінімальними значеннями ПД у ближній зоні НБК, що дуже важливо для організації безпечної діяльності з експлуатації НБК. Найбільші значення ПД зафіксовані з південного боку НБК (площа 2) та південно-західного (південна частина площини 1). З висотою ПД зростає. З північного боку НБК (площина 3) значення ПД в середньому вдвічі нижчі, ніж у площині 2 з південного боку НБК.

Дослідження зафіксували радіаційний стан у ближній зоні НБК після встановлення його у проектне положення над об'єктом «Укриття» [83]; за одержаними даними вивчатиметься динаміка змін радіаційного стану внаслідок демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття», а в подальшому — внаслідок вилучення/переведення в контрольований стан ПВМ.

У 2020—2021 роках провели радіаційні дослідження на майданчику НБК з метою оцінки динаміки змін ПД і кутового розподілу γ-випромінювання після закінчення будівництва НБК порівняно з початком його будівництва. Застосовували радіометр-дозиметр МКС-07 «Пошук» (див. рис. 3.1), пристрій ШД-1 з детекторами ТЛД-500К (див. рис. 3.3), а також радіометр-дозиметр МКС-07 «Пошук» з виносним коливаним детектором (рис. 3.12).



Таблиця 3.4 — Потужність дози у ближній зоні НБК, 2018 рік [83]

№ контрольної точки	Координати контрольної точки	Висота контрольної точки, м	ПД у контрольній точці (показання MiniTRACE-γ S100R, мкЗв/год
Площина 1			
1-1	ряд Р, вісь 73	30	17,7
1-2	ряд Г, вісь 73	30	45,1
1-3	ряд А, вісь 73	30	71,4
1-4	ряд Р, вісь 73	60	20,3
1-5	ряд Г, вісь 73	60	76,7
1-6	ряд А, вісь 73	60	86,9
1-7	ряд Р, вісь 73	90	23,9
1-8	ряд Г, вісь 73	90	58,1
1-9	ряд А, вісь 73	90	83,7
Площина 2			
2-1	ряд І", вісь 39	30	54,9
2-2	ряд І", вісь 55	30	38,4
2-3	ряд І", вісь 65	30	62,1
2-4	ряд І", вісь 39	60	89,2
2-5	ряд І", вісь 55	60	122,6
2-6	ряд І", вісь 65	60	76,0
2-7	ряд І", вісь 39	90	95,6
2-8	ряд І", вісь 55	90	142,9
2-9	ряд І", вісь 65	90	82,8
Площина 3			
3-1	ряд М', вісь 39	30	33,0
3-2	ряд М', вісь 55	30	17,4
3-3	ряд М', вісь 65	30	20,7
3-4	ряд М', вісь 39	60	59,5
3-5	ряд М', вісь 55	60	29,6
3-6	ряд М', вісь 65	60	22,3
3-7	ряд М', вісь 39	90	88,1
3-8	ряд М', вісь 55	90	47,3
3-9	ряд М', вісь 65	90	23,0
Площина 4			
4-1	ряд Т'Т', вісь 39	30	10,4
4-2	ряд Т'Т', вісь 55	30	9,2
4-3	ряд Т'Т', вісь 65	30	7,1

Закінчення табл. 3.4

№ контрольної точки	Координати контрольної точки	Висота контрольної точки, м	ПД у контрольній точці (показання MiniTRACE-γ S100R, мкЗв/год)
4-4	ряд ТТ', вісь 39	60	14,4
4-5	ряд ТТ', вісь 55	60	10,9
4-6	ряд ТТ', вісь 65	60	10,4
4-7	ряд ТТ', вісь 39	90	18,0
4-8	ряд ТТ', вісь 55	90	11,6
4-9	ряд ТТ', вісь 65	90	10,7

Для проведення порівняльного аналізу отриманих результатів з даними попередніх радіаційних досліджень вибирали точки виміру кутових розподілів  $\gamma$ -випромінювання, які максимально можливо наближені до місць вимірів попередніх досліджень.

Плануючи дослідження із застосуванням радіометра-дозиметра МКС-07 «Пошук» з виносним колімованим детектором, вибрали одні точки на відстані 120 м від об'єкта «Укриття», а інші — на відстані 265 м. Ці зони раніше добре обстежені по вимірах надземних полів  $\gamma$ -випромінювання, до початку будівництва арки НБК [84]. Зона досліджень ПД і місця виміру кутових розподілів інтенсивності  $\gamma$ -випромінювання на майданчику НБК наведені на рис. 3.13, картограма розподілу ПД станом на вересень 2020 року — на рис. 3.14.



Рис. 3.10 — Зони вимірів потужності дози, 2018 рік [83]

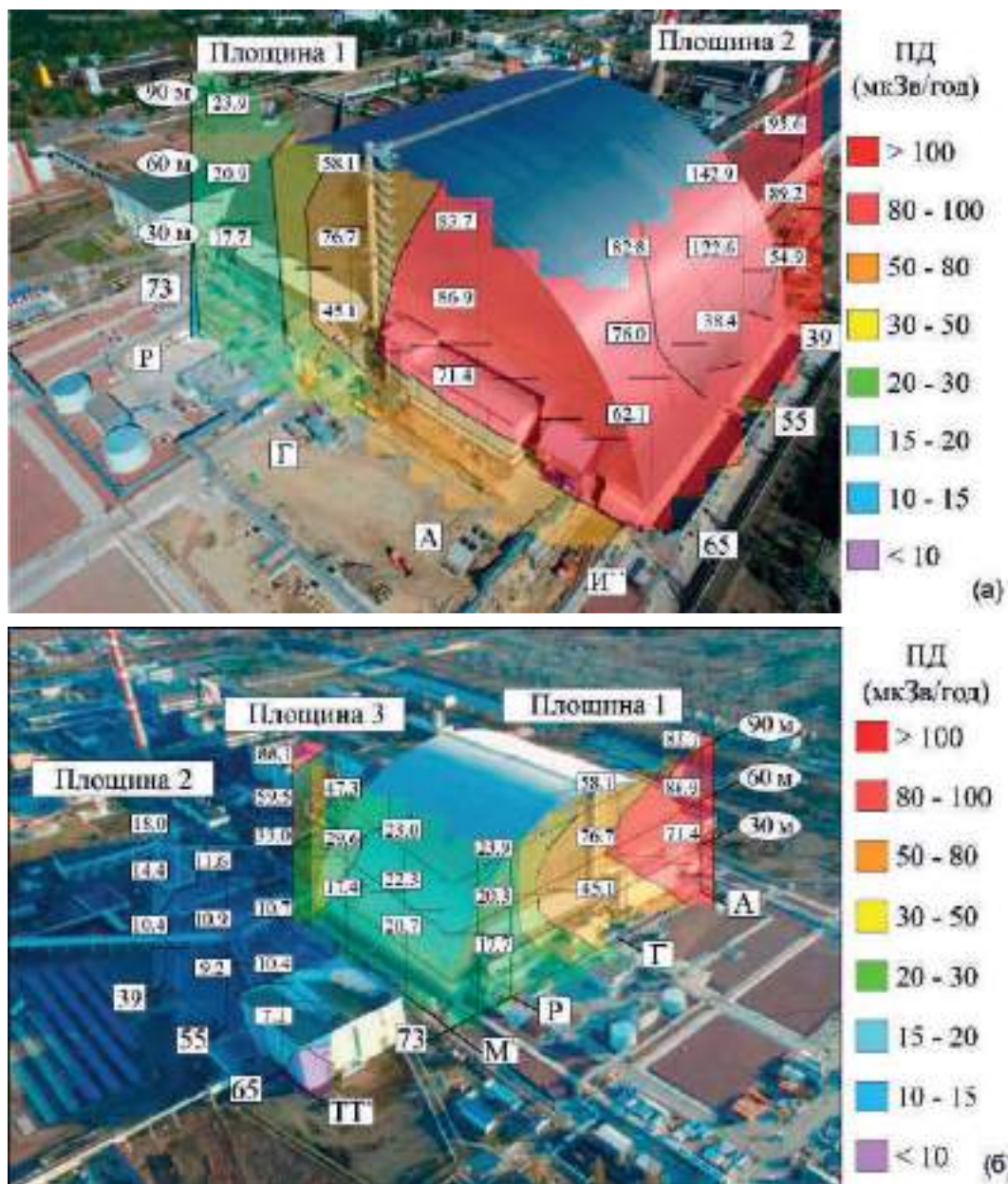


Рис. 3.11 — Картограма потужності дози у ближній зоні НБК, 2018 рік [83]:  
 а — вид на південно-західну частину НБК; б — вид на північно-західну частину НБК



Рис. 3.12 — Радиометр-дозиметр  
МКС-07 «Пошук»  
з виносним колімованим детектором:  
1— свинцевий корпус коліматора з  
детектором  $\gamma$ -випромінювання БДБГ-10;  
2 — лімб для встановлення коліматора  
з детектором у вертикальній площині;  
3 — лімб для встановлення коліматора  
з детектором у горизонтальній площині;  
4 — радіометр-дозиметр МКС-07 «Пошук»;  
5 — тринога

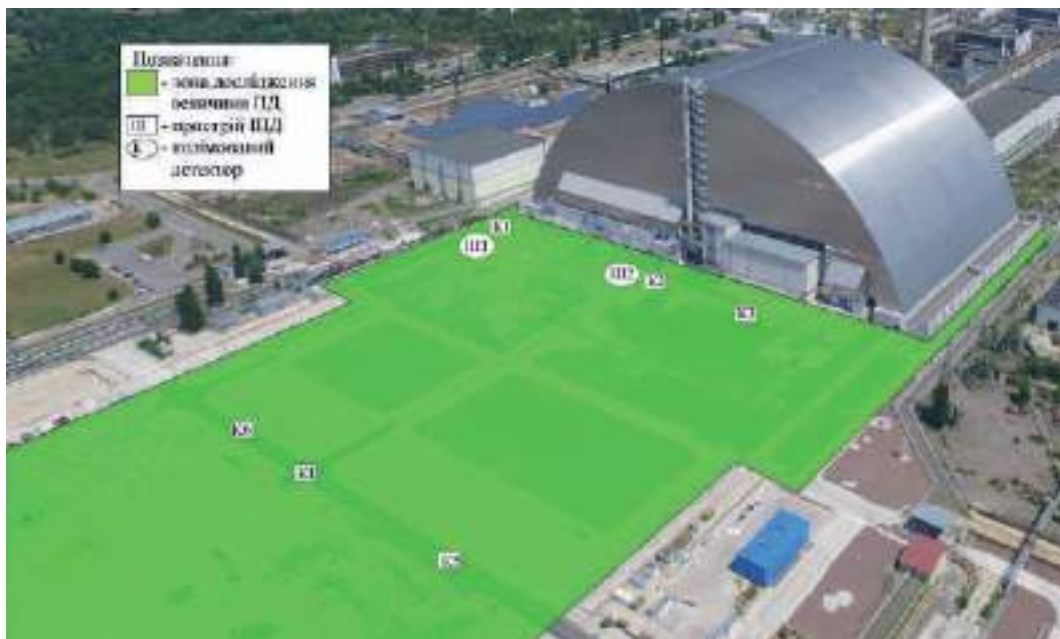


Рис. 3.13 — Зона досліджень потужності дози і місця виміру кутових розподілів  
 $\gamma$ -випромінювання, 2020 рік





Рис. 3.14 — Картограма ПД, мкЗв/год, на майданчику НБК, вересень 2020 року

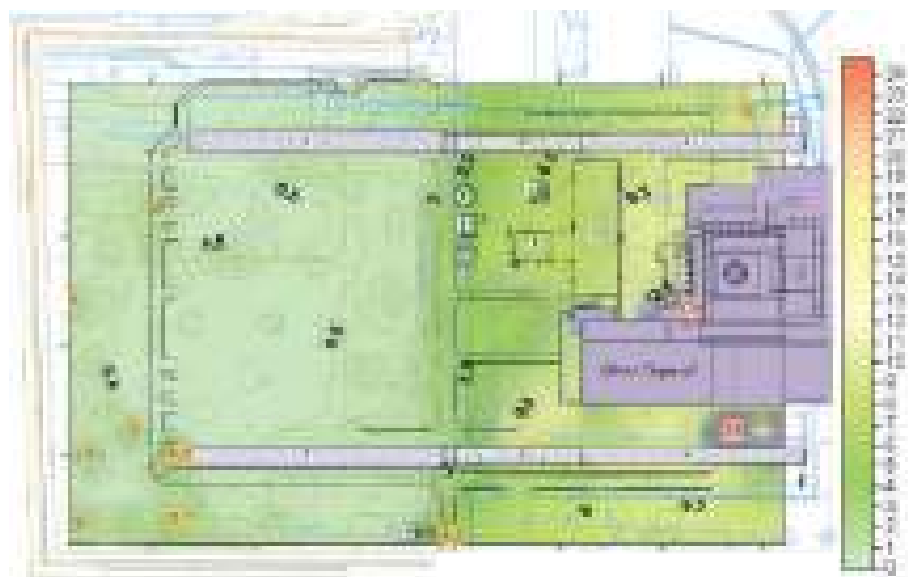


Рис. 3.15 — Картограма потужності дози, мкЗв/год, до початку підготовки майданчика будівництва НБК, 2008 рік

Як бачимо на рис. 3.14, ПД на майданчику НБК знижується із віддаленням від основних джерел  $\gamma$ -випромінювання в об'єкті «Укриття» і лежить у діапазоні від 0,7 до 10 мкЗв/год, за винятком ділянки території з північного боку НБК біля сховища відпрацьованого ядерного палива (СВЯП-1), де потужність дози становить орієнтовно 18 мкЗв/год.

Для оцінки динаміки зміни потужності дози після встановлення НБК в проектне положення на рис. 3.15 наведено картограму ПД до початку підготовки майданчика будівництва НБК [86]. На ній показано, що діапазон розподілу ПД безпосередньо біля конструкцій об'єкта «Укриття» складає від 35 до 125 мкЗв/год, ПД в локальній зоні знаходиться у тому ж діапазоні і потужність дози на промайданчику складає від 5 до 30 мкЗв/год.

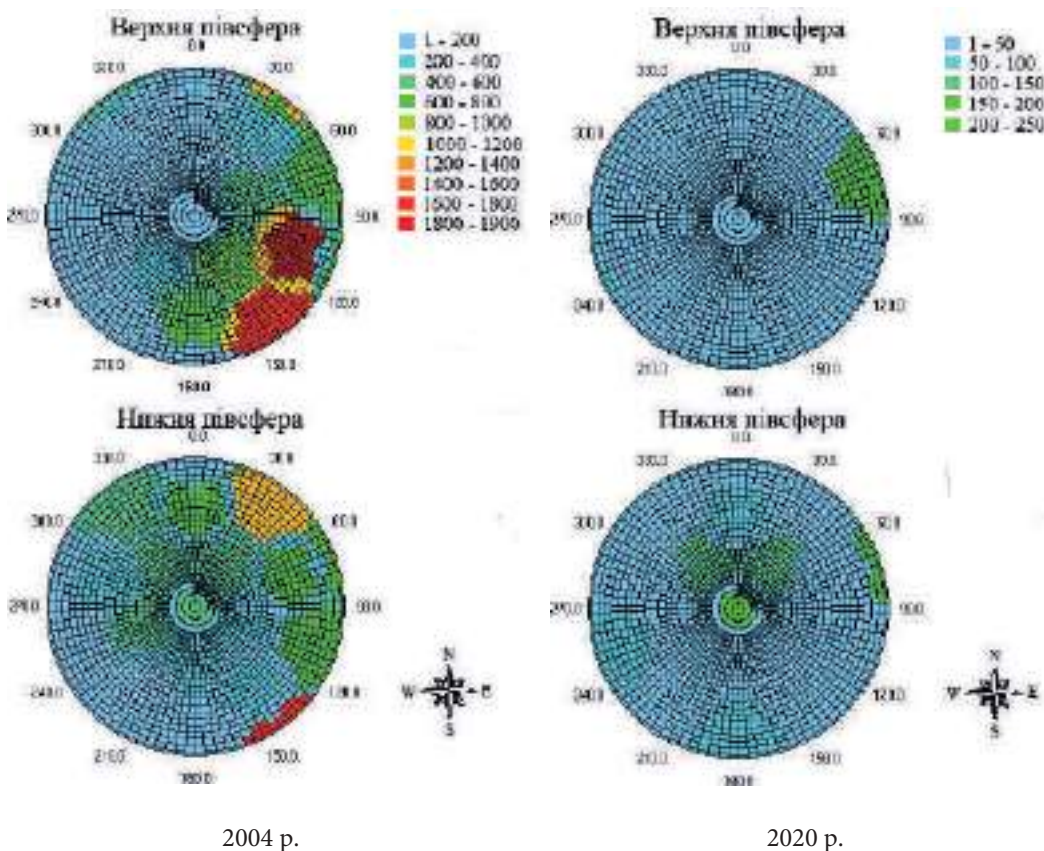


Рис. 3.16 — Картограма кутового розподілу  $\gamma$ -випромінювання в точці ШІ,  
мкР · год<sup>-1</sup> · срад<sup>-1</sup>

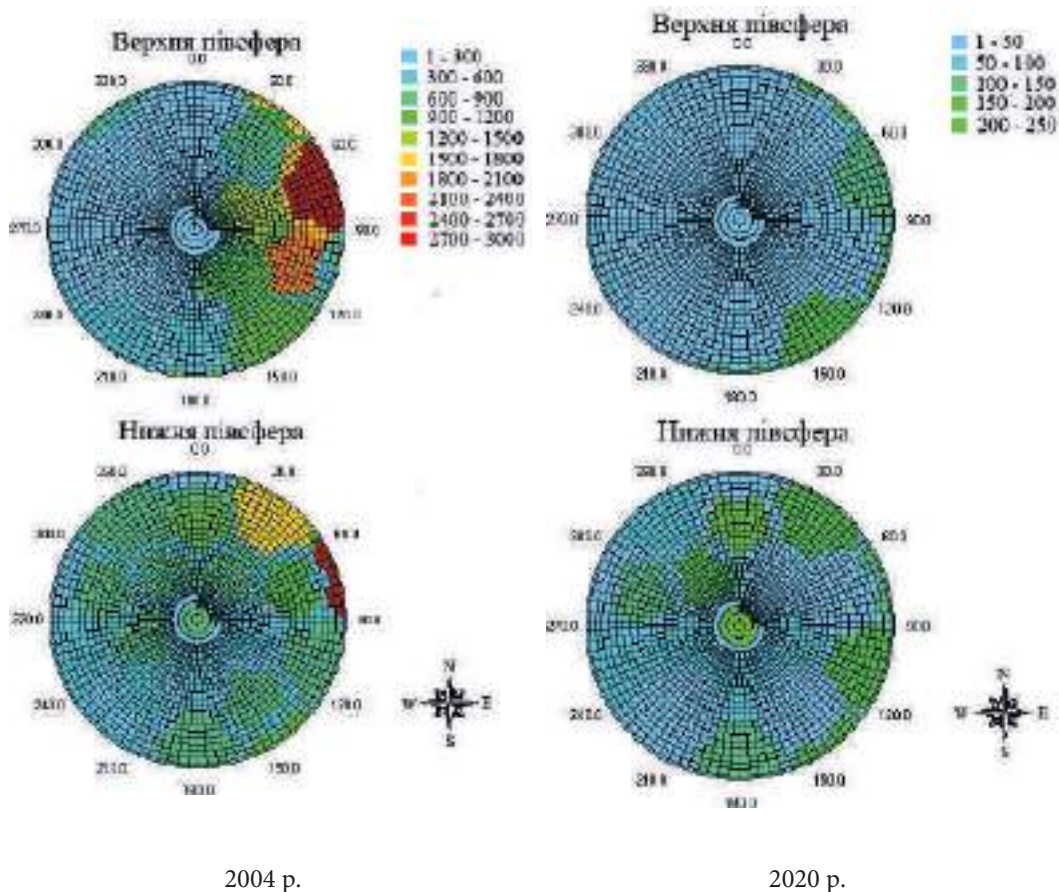


Рис. 3.17 — Картограма кутового розподілу  $\gamma$ -випромінювання в точці Ш2,  $\text{мкР} \cdot \text{год}^{-1} \cdot \text{срад}^{-1}$

Порівняльний аналіз ПД до початку будівництва НБК і після його закінчення виконано для трьох зон (табл. 3.5): зони складання арки; зони переміщення її; зони проектного положення арки. За результатами порівняльного аналізу після установки арки НБК у проектне положення потужність зони на майданчику НБК знизилась від 5 до 15 разів завдяки видаленню в період будівництва локальних джерел іонізуючого випромінювання, а також зведенню нових будівель і споруд (технологічної будівлі, будівлі електротехнічних пристроїв, західної стіни огорожувального контуру НБК), які відіграють роль захисних бар'єрів від ДІВ, що містяться в об'єкті «Укриття».

**Таблиця 3.5 — Результати порівняльного аналізу ПД на майданчику НБК**

Територія майданчика НБК	Потужність дози, мкЗв/год	
	до початку підготовчих робіт	після завершення будівництва НБК
Зона збирання арки	Близько 5	0,7—2
Зона переміщення арки	5—35	4—7
Зона проектного положення арки	35—100	7—10

**Таблиця 3.6 — Результати порівняльного аналізу ПД і напрямків на джерела  $\gamma$ -випромінювання, які дають основний внесок у її формування**

№ точ-ки	До будівництва НБК (2004)		Після будівництва НБК (2021)	
	потужність дози, мкЗв/год	напрямок на основні джерела, що формують ПД	потужність дози, мкЗв/год	напрямок на основні джерела, що формують ПД
K1	59	Джерела, розташовані в об'єкті «Укриття»	3,6	Джерела, розташовані в напрямку СТРРВ
K2	83	Те саме	7,4	Джерела, розташовані в об'єкті «Укриття»
K3	150	– » –	14	
K4	23	– » –	4	Джерела, розташовані в об'єкті «Укриття», а також у напрямку СТРРВ
K5	22	– » –	1,7	Джерела, розташовані в об'єкті «Укриття»
K6	22	– » –	1,6	Джерела, розташовані в об'єкті «Укриття», а також у напрямку СТРРВ

Кутові розподіли  $\gamma$ -випромінювання в окремих точках на майданчику НБК вивчали після встановлення арки в проектне положення на початку 2021 року. Отримані дані порівнювали з даними на час аналогічних досліджень 2004 року в тих самих точках на майданчику об'єкта «Укриття». Картограми кутового розподілу  $\gamma$ -випромінювання пристроєм ШД1 у точках Ш1 і 2 наведено на рис. 3.16 і 3.17. Порівняльний аналіз кутового розподілу інтенсивності  $\gamma$ -випромінювання у точках Ш1 і Ш2 свідчить, що інтенсивність випромінювання у 2020 році значно знизилась порівняно з 2004-м. Крім того, змінились напрямки на джерела  $\gamma$ -випромінювання, які роблять



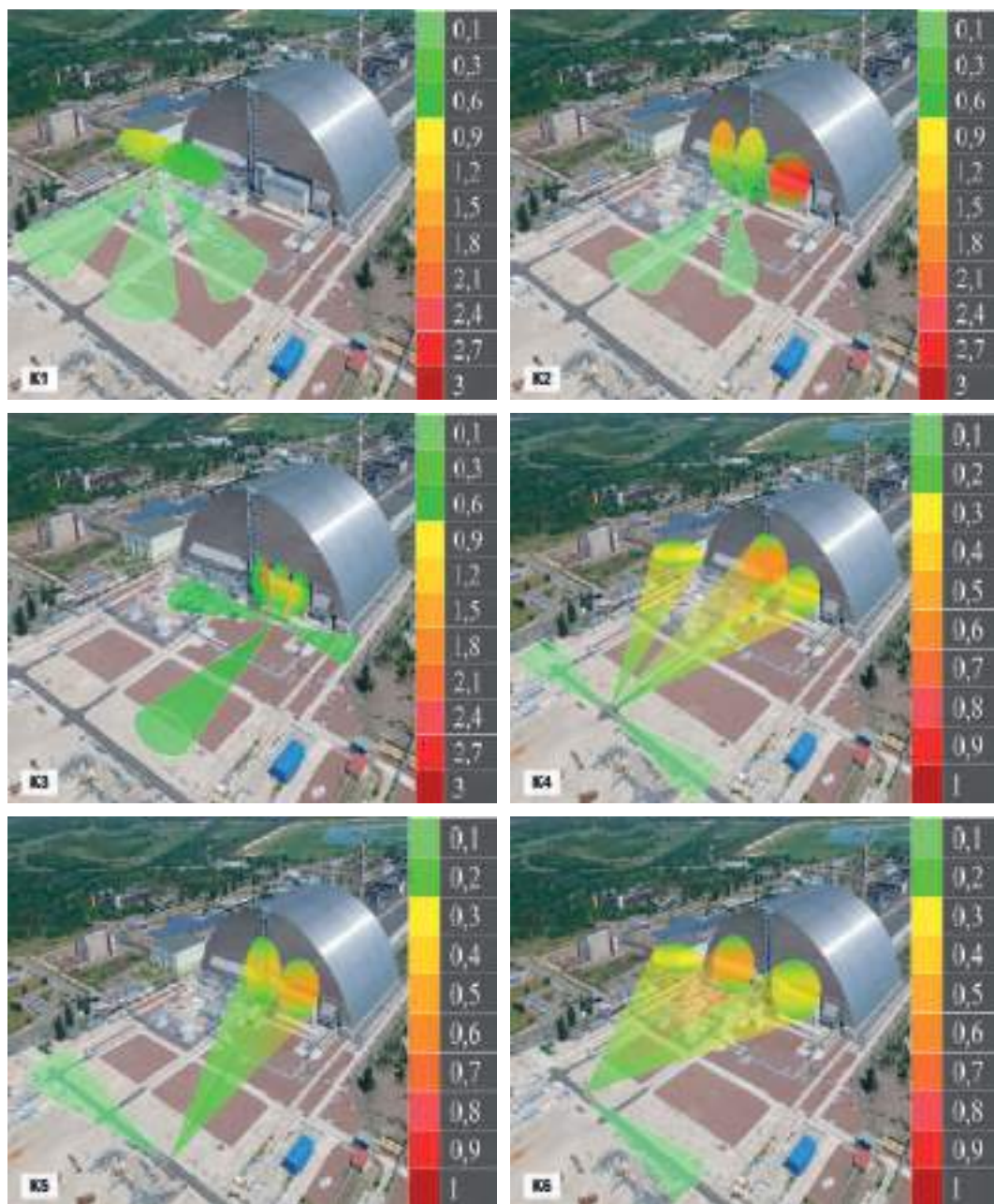


Рис. 3.18 — Основні напрямки на джерела, що формують потужність дози в точках K1—K6

---

---

основний внесок у формування потужності дози. У точці Ш1 до будівництва НБК найбільший внесок у ПД давали джерела, розташовані у південно-східному напрямку. Після зведення НБК, зокрема технологічної будівлі, цей напрямок був заекранований, а тому найбільший внесок у величину ПД стали давати джерела, розташовані в північно-східному напрямку (у районі каскадної стіни). У точці Ш2 до будівництва НБК найбільший внесок у ПД був від джерел, розташованих у східному напрямку, після будівництва НБК — від джерел, розташованих як у північно-східному, так і південно-східному напрямках.

Результати досліджень за допомогою колімованого детектора, що вказують основні напрямки на джерела  $\gamma$ -випромінювання, які формують потужність дози в точках К1—К6, наведено на рис. 3.18.

Порівняльний аналіз ПД і напрямків на джерела  $\gamma$ -випромінювання, які дають основний внесок у формування ПД у точках К1—К6, до будівництва НБК (дані 2004 року) і після будівництва НБК (дані 2021 року), наведено в табл. 3.6. Як бачимо, після будівництва НБК у точках виміру інтенсивність  $\gamma$ -випромінювання зменшилася: середнє значення ПД у 2004 році становило 60 мкЗв/год, а в 2020 році — 5,4 мкЗв/год, тобто десь в 11 разів менше.

Виявлені незначні зміни кутового розподілу  $\gamma$ -випромінювання в окремих точках переважно пов'язані зі зведенням нових будівель і споруд на майданчику НБК, зокрема технологічної будівлі та західної стіни огорожувального контуру НБК. На формування ПД в точках К1, К4 і К6 став помітним вплив напрямку, де розташоване сховище твердих і рідких радіоактивних відходів (СТРРВ). Проте вплив об'єкта «Укриття» на формування радіаційного стану на майданчику НБК залишається незначальним.

### 3.2 Радіоактивні аерозолі

Радіоактивні аерозолі чорнобильського генезису є найбільш радіологічно небезпечними. Вони суттєво впливають на дозові навантаження на персонал, який виконував роботи з ліквідації аварії 1986 року, та на довкілля. Саме тому впродовж 35 років поведінці РА приділялась особлива увага, а дослідження носили масштабний характер. Аналізуючи роботи останніх років можна виділити три вагомих етапи формування та впливу РА.

Перший етап (1986 рік)— це активна стадія аварії. Температура активної зони реактора, що встановилася в результаті залишкового тепловиділення і горіння графіту, призвела до додаткового диспергування й виносу з активної зони паливних частинок різного ступеня окиснення, а також витоку низки летких радіонуклідів. За різними оцінками, могло утворитися від 10 до 30 т паливного пилу. Частина його була викинута за межі зруйнованого четвертого енергоблоку і сформувала паливну компоненту

---

---

радіоактивного забруднення територій, інша частина залишилась там у вигляді осідань, забруднюючи поверхні будівельних конструкцій.

Другий етап (1987—2017 роки) — побудова і експлуатація об'єкта «Укриття». Ця захисна споруда дала змогу зменшити вихід РА у довкілля і значно покращити (на декілька порядків) радіаційний стан прилеглої території. Введення масштабної за площею дії системи пилопригнічення ще на кілька порядків знизила рівні забруднення повітря РА усередині об'єкта «Укриття» і викиди в довкілля.

Третій етап (2017—2020 роки) — побудова і введення в експлуатацію НБК, який повністю виключив надходження РА з об'єкта «Укриття» в довкілля.

Багаторічними дослідженнями встановлено, що в об'єкті «Укриття» міститься багато дрібнодиспергованого палива, утвореного під час аварії, і кількість його надалі збільшувалась в результаті механічного, фізико-хімічного впливу на ПВМ та радіоактивно забруднені будівельні конструкції. Паровий вибух зумовив викид диспергованих частинок (розміром від одиниць до десятків мікронів) ядерного палива в атмосферу. Субмікронні фракції паливного пилу за різними оцінками становили близько 4 % загальної активності пилу. Швидкість гравітаційного осідання частинок пилу такого розміру дорівнює приблизно 85 см/с. Радіоактивний пил переносився повітряними потоками і формував радіоактивне забруднення як всередині об'єкта «Укриття», так і в навколишньому середовищі [87, 88].

Встановлено кілька механізмів формування РА в період активної стадії аварії [28]: диспергація палива. Дисперговані частинки зустрічаються у внутрішніх приміщеннях об'єкта «Укриття» і на «західному сліду», сформованому відразу після аварії; пароцирконієва реакція. Саме цей механізм міг бути причиною формування уран-цирконієвих частинок у вигляді фрагментів оксидів урану в цирконієвій оболонці;

вивітрювання з ЛПВМ. Верхня оцінка швидкості утворення продуктів вітрової ерозії на поверхні коричневих ЛПВМ становить коло  $1,9 \text{ мкг}/(\text{см}^2 \cdot \text{рік})$ . Сумарне річне пилоутворення може сягати  $7 \cdot 10^{11}$  Бк за  $\alpha$ -активністю та  $4 \cdot 10^{13}$  Бк — за  $\beta$ -активністю. З урахуванням питомої активності ЛПВМ щорічне надходження радіоактивного пилу за цим механізмом могло вимірюватися кількома десятками кілограмів;

високотемпературне окислення фрагментів палива на повітрі. Окислені в атмосфері повітря паливні таблетки за температур у кілька сотень градусів через одну — три години розсипаються на частинки  $\text{U}_3\text{O}_8$  розмірами 1—15 мкм;

руйнування ЛПВМ у процесі вилугування. Атмосферна волога, яка надходила всередину об'єкта «Укриття», взаємодіяла з ЛПВМ, руйнуючи їх та додатково утворюючи РА розмірами менш як 1 мкм. З окислених частинок у нейтральних або слабколужних середовищах (як в об'єкті «Укриття») та в разі постійного контакту з водою 90 % активності могло перейти в розчин впродовж одного року. Подальше руйнування таких мікроблоків формувало субмікронні частинки, що містять уран.



Протягом 30 років (1987—2017) після побудови об'єкта «Укриття» паливний пил накопичувався через руйнування відкритих поверхонь ЛПВМ і радіоактивно забруднених будівельних конструкцій, утворення нових джерел РА внаслідок пересихання донних відкладень та їх ерозії, руйнування новоутворень на поверхні ЛПВМ [5]. Змінювались властивості ЛПВМ, що проявлялося в їх розтріскуванні, руйнуванні на великі фрагменти і, як наслідок, посиленні пилогенеруючої активності. Через деструкцію на нижніх позначках об'єкта «Укриття» щороку могло утворюватися майже 50 кг паливного пилу: за  $\alpha$ -активністю —  $5 \dots 10 \text{ Бк} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{добу}^{-1}$ , за  $\beta$ -активністю —  $300 \dots 900 \text{ Бк} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{добу}^{-1}$ . Основний внесок у формування РА в об'єкті «Укриття» робив вторинний пилопідйом через техногенну діяльність і перенесення РА повітряними потоками. Частина пилу виносилась за межі об'єкта «Укриття» через вентиляційну трубу блоків 3/4 Чорнобильської АЕС (до 2013 року), а потім, до 2017 року, — через нову ВТ і нещільності у стінах та покрівлі об'єкта «Укриття» [5, 56].

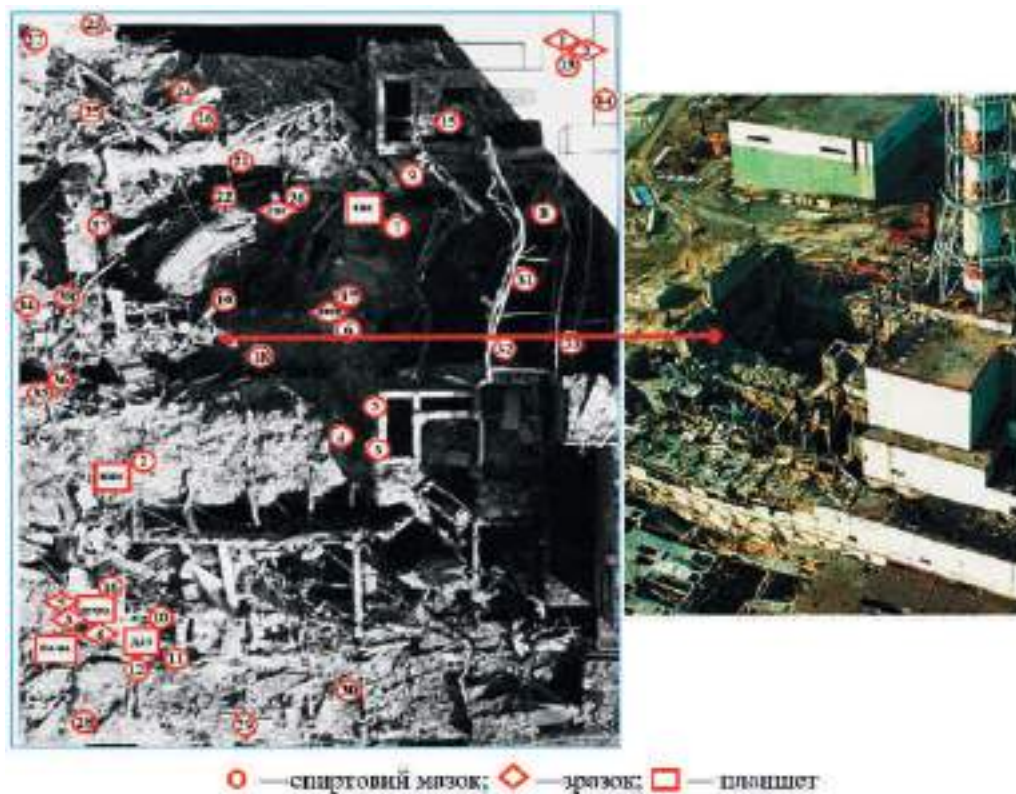


Рис. 3.19 — Місця відбору зразків у підпокрівельному просторі об'єкта «Укриття», 1997 рік



---

Перше повномасштабне дослідження кількості та властивостей радіоактивного пилу в просторі під покрівлею об'єкта «Укриття» на десятках відібраних зразків (рис. 3.19) відбулось 1997 року [89, 90].

Узагальнення накопиченої до кінця 1990-х років інформації [89] показало: забруднення на поверхні розвалу четвертого енергоблока характеризується густиною пилу  $14 \text{ г/м}^2$ ;

у підпокрівельному просторі об'єкта «Укриття», де працює МСПП, міститься від 4 до 5 т паливного пилу (U) [38, 90, 91];

за оцінкою [26] кількості паливного пилу в приміщеннях, які мають повітряний зв'язок з підпокрівельним простором, а також у шахті реактора (прим. 504/2) і прим. 305/2, 404/3 і 404/4, які після аварії утворили з прим. 504/2 єдиний простір, міститься від 2,7 до 3,5 т радіоактивного пилу, не закріпленого пилопригнічувальними розчинами і здатного до вторинного пилопідйому.

Приблизна оцінка кількості паливного пилу (U) в межах об'єкта «Укриття» на той час могла становити близько 10 т.

Дисперсний склад паливних частинок як в окремому приміщенні, так і в об'єкті «Укриття» загалом не є постійним. У забруднених приміщеннях під час виконання робіт, що супроводжуються струсом, вібрацією стін, стелі, підлоги тощо, у розподілі аерозолів збільшується внесок великих частинок. У разі, коли зовнішніх впливів довго немає, важкі великі частинки осідають, і розподіл зсувається в область малих значень. У процесі зварювання або інших вогневих робіт зростає внесок субмікронної фракції [87].

Густина паливних частинок визначається наявністю в них оксидів урану  $\text{UO}_2$  та  $\text{U}_3\text{O}_8$  і становить від 2 до  $10,9 \text{ г/см}^3$ .

Радіонуклідний склад паливних частинок залежить від їх різновидів:

$\text{UO}_2$  — (найтиповіший у складі більшості частинок);

$\text{Zr}_x\text{U}_y\text{O}_z$  різного стехіометричного складу. У деяких зразках внесок цього типу частинок становить до 40 %;

$\text{UO}_2$  з домішками Zr. Внесок такого типу частинок у загальну кількість незначний; це свідчить про те, що температура понад  $2600^\circ\text{C}$  була лише в деяких ділянках активної зони;

частинки вищих оксидів урану, що утворилися в процесі високотемпературного окислення палива в повітряній атмосфері. Ці частинки за минулий час піддалися максимальному ступеню трансформації через свої малі розміри (одиниці мікронів) і високий вміст урану.

Радіонуклідний склад паливовмісних частинок можна вважати «середньопаливним». Респірабельна фракція частинок (до 10 мкм) має двократне збіднення по ізотопах цезію, але півтора-двократне збагачення по нуклідах стронцію, плутонію та америцію.

### Радіонуклідний склад паливних частинок на 01.01.2015:

Нуклід	Активність, Бк/г (U)
$^{90}\text{Sr}$	$5,97 \cdot 10^8$
$^{90}\text{Y}$	$5,97 \cdot 10^8$
$^{137}\text{Cs}$	$7,23 \cdot 10^9$
$^{238}\text{Pu}$	$6,19 \cdot 10^6$
$^{239}\text{Pu}$	$5,00 \cdot 10^6$
$^{240}\text{Pu}$	$8,18 \cdot 10^6$
$^{241}\text{Am}$	$2,41 \cdot 10^7$
$^{241}\text{Pu}$	$2,41 \cdot 10^8$

Відношення радіоактивної складової пилу до нерадіоактивної за наближеними оцінками становить 0,5—1 %. Велика кількість радіоактивного пилу в підпокрівельному просторі в зоні дії МСПП закріплена пилопригнічувальними розчинами. Але значна маса пилу (майже 4 т) міститься в приміщеннях, які пов'язані повітряними потоками з підпокрівельним простором, поза зоною дії МСПП, і може формувати забруднення внаслідок вторинного пилопідйому. До складу радіоактивного пилу входять всі радіонукліди чорнобильського генезису ( $^{90}\text{Sr}$  +  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  та уран. Медіанний аеродинамічний діаметр за масою (AMAD) пилових частинок лежить у діапазоні 0,1—250 мкм.

#### 3.2.1. Паливні «гарячі» частинки

Крім описаних морфологій паливного пилу об'єкта «Укриття», особливий інтерес становлять так звані гарячі частинки (ГЧ). Сформовані в різні періоди активної стадії аварії, за різних температурних умов, вони несуть інформацію про можливі хімічні та теплофізичні процеси їх виникнення, а маючи малі розміри і велику питому активність, є найнебезпечнішими.

ГЧ поділяють на слабо та сильно трансформовані паливні частинки [92—94]. Слабо трансформовані паливні частинки (рис. 3.20, а) могли утворитися на першій стадії аварії і були викинуті переважно в західному напрямку. Вони являють собою фрагменти ядерного палива з добре вираженою зернистою структурою або окремі зерна (кристаліти)  $\text{UO}_2$ . На рис. 3.20, а добре видно пухирі — результат дифузії й скупчення газоподібних продуктів поділу за температури 1300—1700 К. Якщо температура більша, спостерігається міграція самих пухирів по міжзеренному просторі та злиття їх, що дає специфічний малюнок поверхні зерна (рис. 3.20, б).

На наступних стадіях аварії утворювались паливні частинки з високим ступенем трансформації матриці. Внаслідок дифузії кисню поверхня  $\text{UO}_2$  розтріскувалася через різну щільність кристалічних ґраток утворюваних вищих оксидів урану. За високої температури паливо могло частково оплаватися (рис. 3.21, а), контактуючи

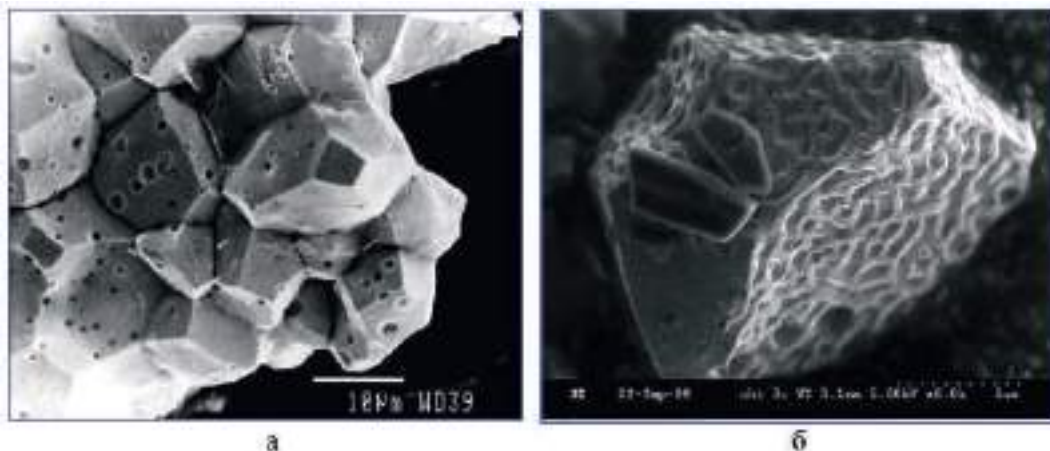


Рис. 3.20 — Зовнішній вигляд слабо трансформованих паливних частинок, отриманий за допомогою електронної мікроскопії:

*а* — в Норвезькому сільськогосподарському університеті (NLH, Норвегія);  
*б* — в Інституті ядерної безпеки і радіаційного захисту (IPSN, Франція)

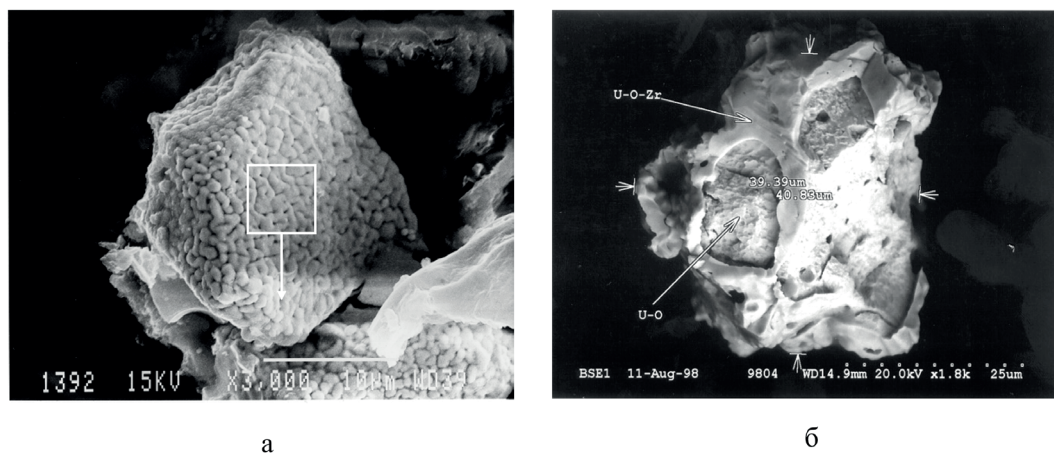


Рис. 3.21 — Типовий зовнішній вигляд сильно трансформованих паливних частинок, отриманий за допомогою електронної мікроскопії:

*а* — в Норвезькому сільськогосподарському університеті (NLH, Норвегія);  
*б* — в Інституті ядерної безпеки і радіаційного захисту (IPSN, Франція)

з різними конструкційними матеріалами (графіт, цирконій, сталь тощо) і матеріалами засипки реактора (пісок, свинець і таке інше), що призводило до утворення складних хімічних сполук, особливо на поверхні паливних частинок.

Оплавлені паливні частинки містять цирконій. Це, очевидно, зумовлено більш високою температурою плавлення оксидів урану порівняно з їхніми сплавами з цирконієм і циркалоєм. «Чиста» ( $\text{UO}_2$ ) паливна частинка, оплавлена цирконієвим сплавом (U-O-Zr), зображена на рис. 3.21, б.

Дослідження характеристик ГЧ [95] показали, що приблизно половина з частинок мала матрицю ядерного палива, і тому їх можна класифікувати як паливні «гарячі» частинки. В матриці решти частинок виявили конструкційні хімічні елементи, тому їх класифікували як паливно-конструкційні «гарячі» частинки (ПКГЧ).

Паливні «гарячі» частинки — це оксид урану, що зберіг всі морфологічні ознаки опроміненого ядерного палива. У процесі роботи реактора під впливом високих температур у внутрішній зоні паливної пігулки відбувається рекристалізація вихідної структури спресованого порошку двооксиду урану (розмір частинок приблизно 3 мкм), тобто збільшення розміру зерен до 25 мкм внаслідок перекристалізації їх. Ці зерна мають характерну форму поліедрів, грані яких здебільшого мають форму п'ятикутників. Рівна поверхня цих граней декорована отворами від бульбашок атомів газів (уламків поділу урану), за кількістю яких можна в першому наближенні оцінити тривалість кампанії паливної касети (рис. 3.22).

Серед паливних «гарячих» частинок були виявлені частинки (рис. 3.23), морфологія поверхні яких дуже відрізняється від показаної на рис. 3.22. Така мікротопографія

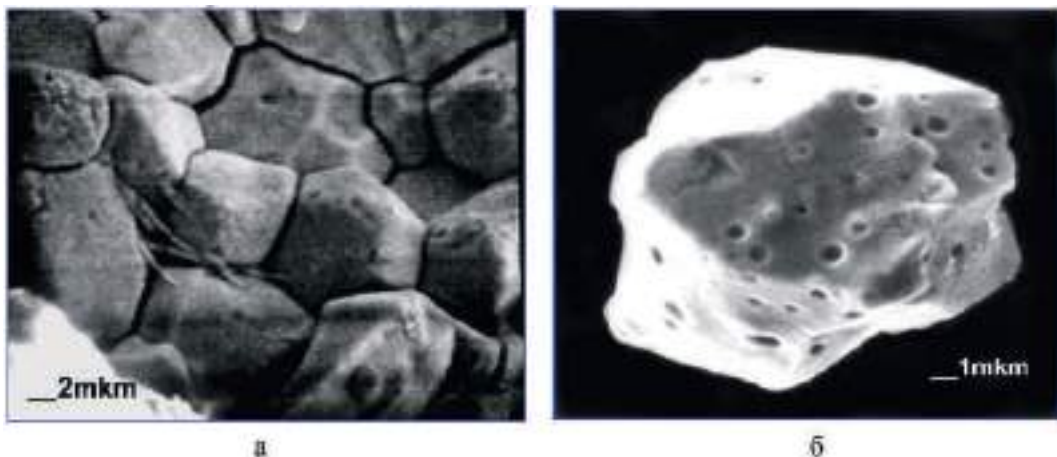


Рис. 3.22 — Фрагмент паливно-конструкційних «гарячих» частинок:  
а — сукупність рівноважних зерен оксиду урану; б — окреме зерно кристаліту  $\text{UO}_2$



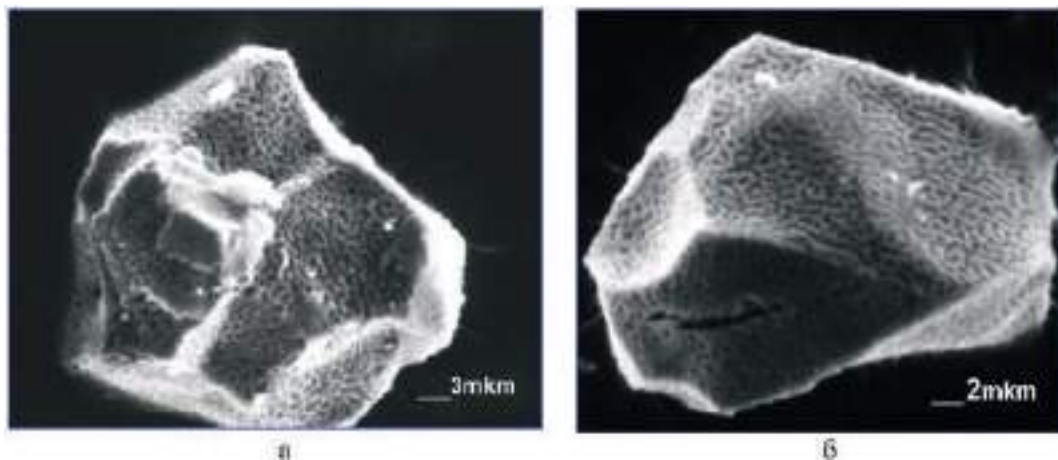


Рис. 3.23 — Паливно-конструкційні «гарячі» частинки:  
*а* — із західного сліду; *б* — з фрагменту твела об'єкта «Укриття»

поверхні зерен опроміненого палива спостерігається після випробувань відпрацьованих твелів в імпульсному реакторі [96], де на твел впливав короткий (близько 3 мс) потужний імпульс потоку нейтронів. Утворені при цьому газоподібні уламки поділу створюють у паливній матриці надлишковий тиск, що спричинює пластичну деформацію поверхні кристалітів діоксиду урану з утворенням характерної фактури, яка відображає розташування дислокацій в поверхневому шарі. Кількість таких частинок з різним ступенем поверхневого пошкодження становить орієнтовно 10 % усіх паливних «гарячих» частинок, відібраних на західному сліду. Наявність частинок зі схожою мікротопографією поверхні однозначно вказує на вплив нейтронного імпульсу вибухоподібного характеру.

Паливно-конструкційні «гарячі» частинки мають матрицю з елементним складом U-Zr-O. Співвідношення урану і цирконію у складі ПКГЧ дуже різноманітне — від цирконієвих частинок з домішкою діоксиду урану до частинок, що складаються з діоксиду урану з домішкою цирконію. Структура ПКГЧ — від гомогенного складу (типу твердого розчину  $\text{UO}_2\text{-Zr-ZrO}_2$ ) з домішкою корозійностійкої сталі до співіснування в межах однієї частинки областей змінного складу з дискретністю неоднорідності від кількох мікрометрів і більше. Рентгеноструктурний аналіз деяких ПКГЧ показує, що матеріал, з якого вони складаються, явно пройшов через стадію швидкої кристалізації і дає досить чітку дифракційну картину. Рентгенограми їх не можуть бути ототоженні ні з  $\text{UO}_2$ , ні з Zr, ні з  $\text{ZrO}_2$  і водночас добре зіставляються з еталонними спектрами  $\text{Nd}_2\text{Zr}_3\text{O}_7$ ,  $\text{Ce}_2\text{Zr}_3\text{O}_{10}$  [97], що підтверджує структуру матриці цих частинок як твердий розчин складу  $\text{UO}_2\text{-Zr-ZrO}_2$ .

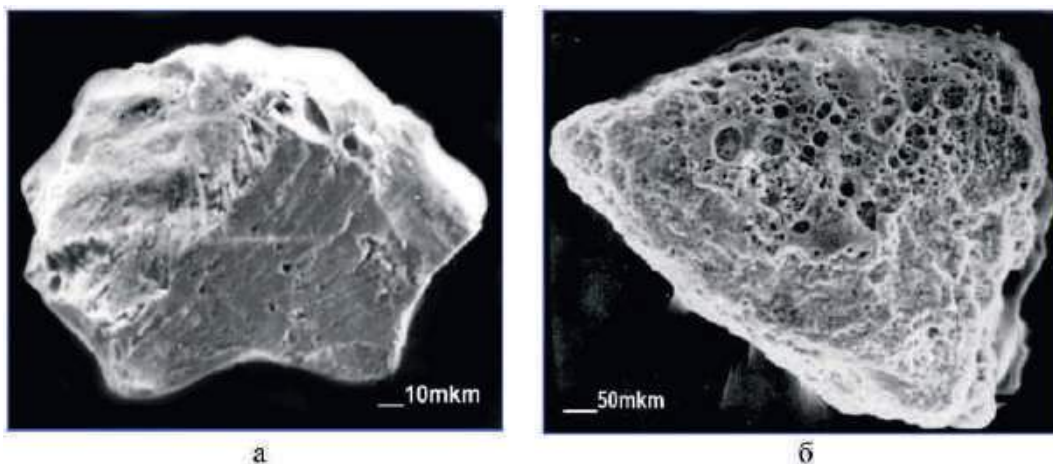


Рис. 3.24 — Паливно-конструкційні «гарячі» частинки:  
*а* — масивної структури; *б* — з кавернами від інтенсивного газовиділення

Зовнішній вигляд ПКГЧ різноманітний, максимальний розмір знайдених частинок становить 850 мкм. Типова морфологічна характеристика цих частинок — неправильні уламкові, масивні форми, шлакоподібні та оплавлені поверхні (рис. 3.24). Для частинок з масивної структурою (рис. 3.24, *а*) характерна монолітна будова

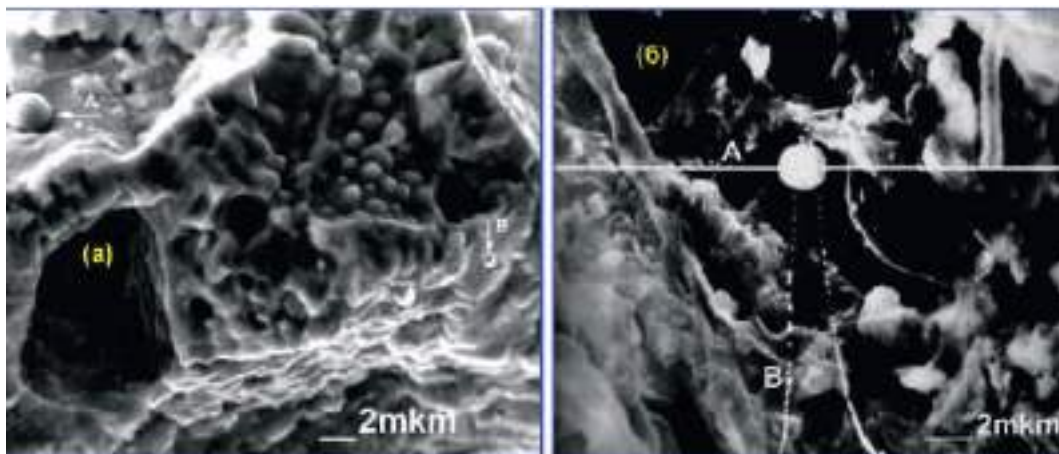


Рис. 3.25 — Фотографії ПКГЧ:  
*а* — каверни від газових бульбашок та сферичні мікрочастинки на поверхні «великої» ПКГЧ;  
*б* — сферична ПКГЧ в ґрунті; А — лінія сканування зонда; В — розподілення урану

---

---

з гострими відколами і гладкою поверхнею граней, що свідчить про утворення їх внаслідок подрібнення матеріалу в твердій фазі.

За результатами кількісного і структурного аналізів, перед вибухом реактора відбувалося окислення й плавлення цирконієвих деталей ТВЗ і дистанційних решіток, плавлення паливних стрижнів. Вміст практично у всіх ПКГЧ  $^{60}\text{Co}$  вказує на те, що за кілька секунд відбулося інтенсивне перемішування розплаву, який мав би бути низької в'язкості. Поверхня шлакоподібних частинок (рис. 3.25, а) містить округлі каверни від газових бульбашок різних розмірів і концентрації, що свідчить про швидке охолодження матеріалу. Всі ПКГЧ розміром більш як 10 мкм мають ізометричну форму; серед них зовсім нема частинок, утворених з рідкої фази, тобто сферичної або краплеподібної форми.

На поверхні деяких ПКГЧ та в ґрунті виявлені дрібні частинки (0,5—2 мкм) сферичної форми (рис. 3.25, б). Вони могли утворитися внаслідок конденсації з парової фази в епіцентрі вибуху з подальшим осіданням на різноманітні поверхні, зокрема на ПКГЧ.

Дослідження ПКГЧ дає змогу встановити хронологію розвитку аварійних процесів у реакторі. Спочатку в локальній аварійній області реактора відбулося плавлення оболонок твелів, несучих стрижнів, дистанційних решіток і паливних стрижнів пігулок нижніх ТВЗ з утворенням рідкої фази  $\text{UO}_2\text{-Zr-ZrO}_2$ . Потім розплав був охолоджений до твердої фази, після чого диспергований на частинки мікронних розмірів потужним вибухом і викинутий за межі енергоблока у вигляді аерозольних частинок.

### **3.2.2 Радіоактивні аерозолі в підпокрівельному просторі об'єкта «Укриття»**

Основними джерелами радіоактивних аерозолів у підпокрівельному просторі об'єкта «Укриття» є деструкція відкритих скупчень ЛПВМ з утворенням паливного пилу, руйнування будівельних конструкцій, деструкція висушлих донних відкладень радіоактивної води, вторинний пилопідйом та перенесення в результаті техногенної діяльності (робота МСПП, будівельно-монтажні роботи), вторинний пилопідйом та перенесення через старіння й обрушення нестабільних будівельних конструкцій.

До побудови НБК протягом багатьох років проводився моніторинг радіоактивних аерозолів у різних точках простору об'єкта «Укриття», зокрема викидів РА через нещільності покрівлі (рис. 3.26, 1), у системі «байпас» (рис. 3.26, 2), на верхніх позначках та підпокрівельному просторі, генерації РА з відкритих скупчень ЛПВМ.

Регулярний контроль концентрації й дисперсного складу РА, що надходять з підпокрівельного простору об'єкта «Укриття» в атмосферу через систему «байпас» і вентиляційну трубу, проводять з 2002 року. Проби відбирають у прим. 2016/2 через люк (3.27). Відбір частинок аерозолів та класифікацію їх за розмірами здійснюють за допомогою п'ятикаскадного імпактора ИБФ-5К. Пристрій сортує аерозольні частинки по п'яти діапазонах аеродинамічного діаметра: до 0,5 мкм; 0,5—1,2 мкм; 1,2—3,7 мкм;

3,7 —8,5 мкм; 8,5—17,0 мкм. Для сортування частинок до 0,5 мкм використовують тонкодисперсний фільтр, щоб повніше уловлювати аерозолі субмікронного розміру. Вміст  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$  і  $^{241}\text{Am}$  визначається  $\gamma$ -спектрометричним методом.

До побудови НБК об'ємна активність  $\Sigma\beta$ -радіонуклідів у системі «байпас» (див. рис. 3.28) відрзнялась великим розкидом показань — від 0,1 до 1000 Бк/м<sup>3</sup>, що пов'язано із зовнішнім впливом техногенної діяльності в об'єкті «Укриття» [87].

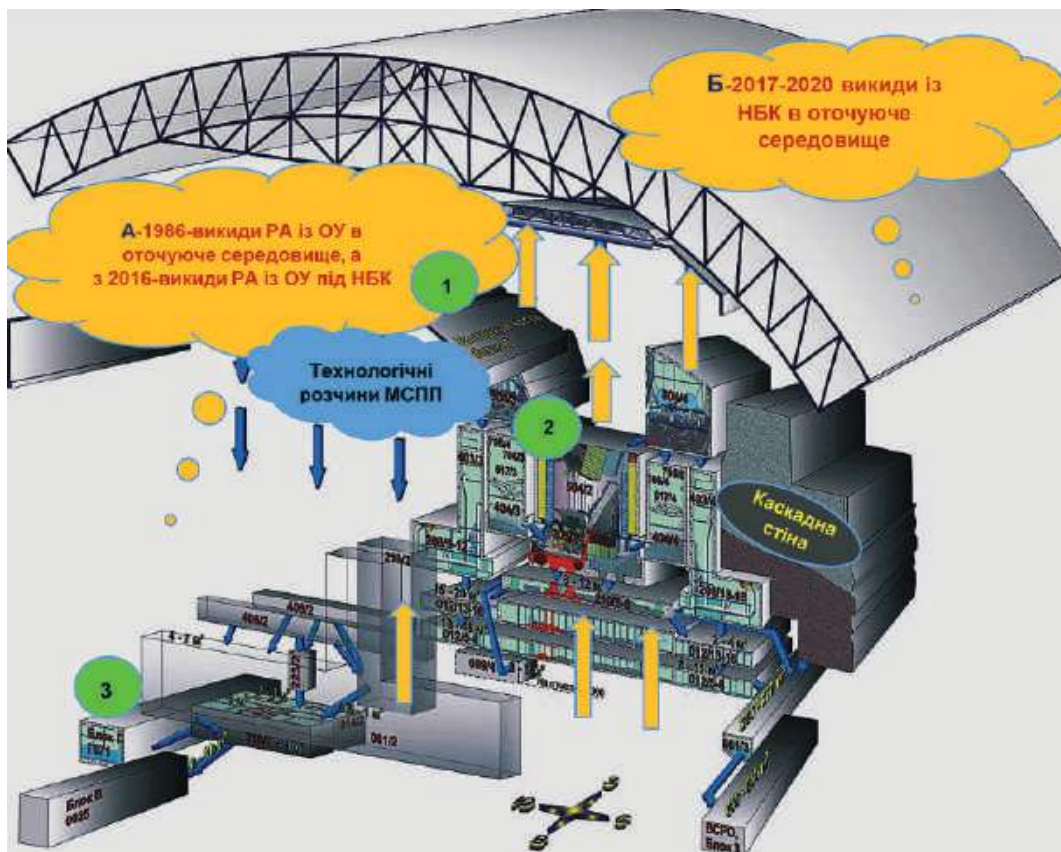


Рис. 3.26 — Схема формування та розповсюдження радіоактивних аерозолів у НБК:

А — викиди з об'єкта «Укриття»; Б — викиди з НБК;

1 — точка контролю викидів радіоактивних аерозолів в основний об'єм НБК на верхніх позначках на покрівлі об'єкта «Укриття»; 2 — контроль дисперсного і радіонуклідного складу радіоактивних аерозолів у підпокрівельному просторі об'єкта «Укриття» (система «байпас»); 3 — контроль приземного шару повітря в основному об'ємі НБК



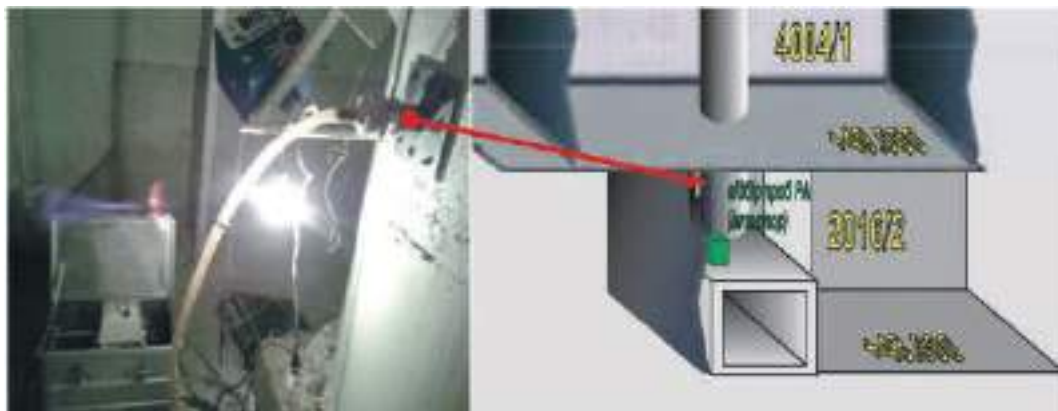


Рис. 3.27 — Розташування точки відбору проб радіоактивних аерозолів у системі «байпас» (прим. 2016/2 об'єкта «Укриття»)

Цей вплив не був домінуючим чинником, він носив епізодичний характер, інтенсивний за амплітудою і короткочасний. Об'ємна активність  $\Sigma\beta$  2016 року лежала в діапазоні від 0,34 до 3,9 Бк/м<sup>3</sup>. Як правило, носіями радіонуклідів — продуктів чорнобильської аварії — були частинки AMAD 8—11 мкм [98, 99].

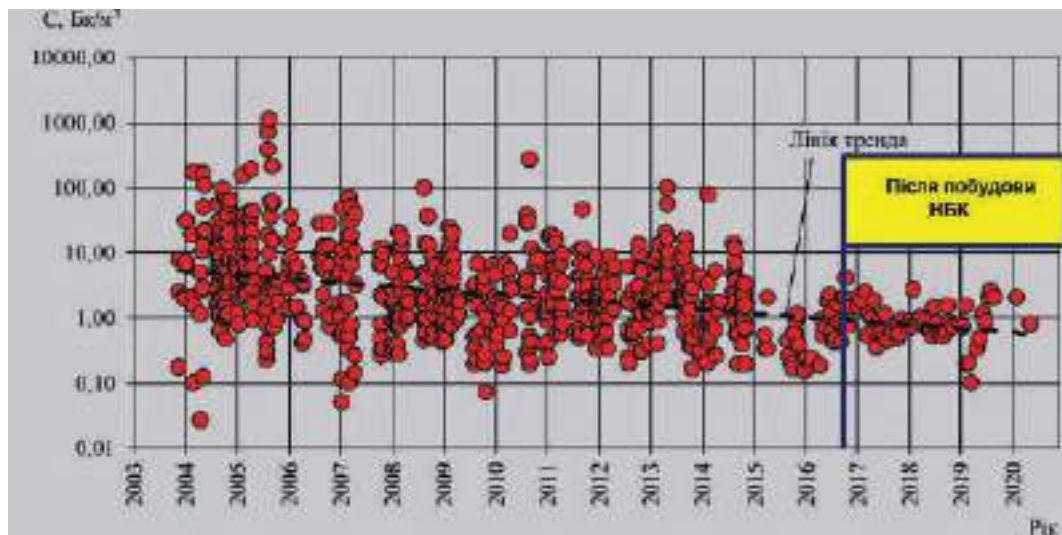


Рис. 3.28 — Динаміка об'ємної активності  $\Sigma\beta$  в системі «байпас», 2003—2020 роки

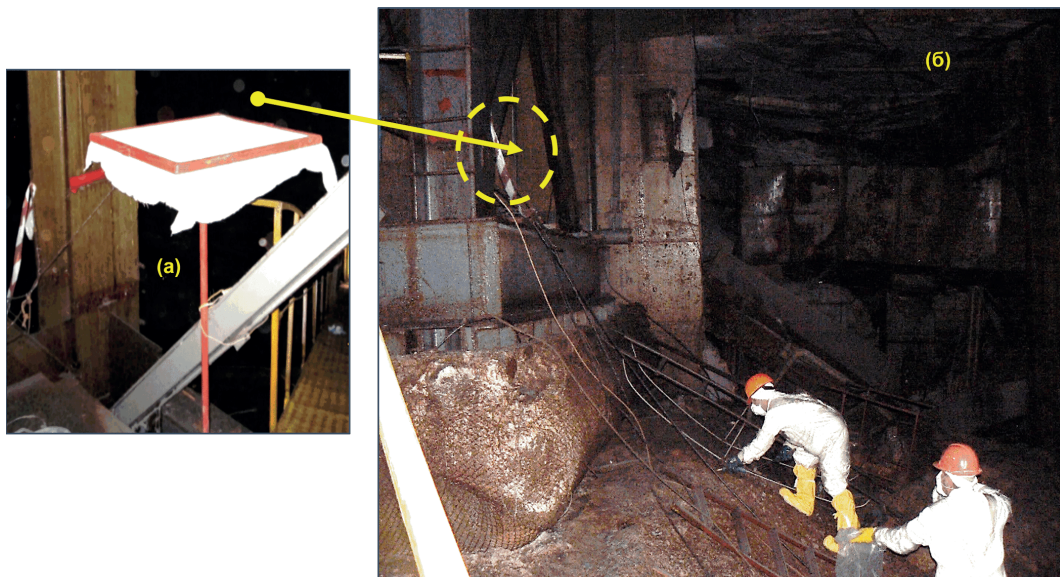


Рис. 3.29 — Осаджувальний планшет для збору аерозольних випадінь біля західної опори балки «Мамонт»:

*а* — загальний вигляд осаджувального планшета; *б* — місце встановлення

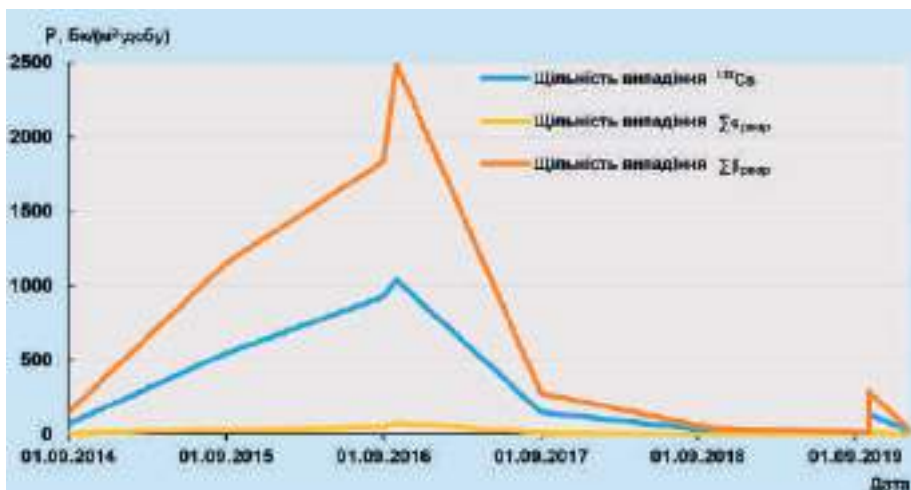


Рис. 3.30 — Щільність випадінь  $^{137}\text{Cs}$ ,  $\Sigma\alpha_{\text{розр}}$ ,  $\Sigma\beta_{\text{розр}}$  в підпокрівельному просторі об'єкта «Укриття»

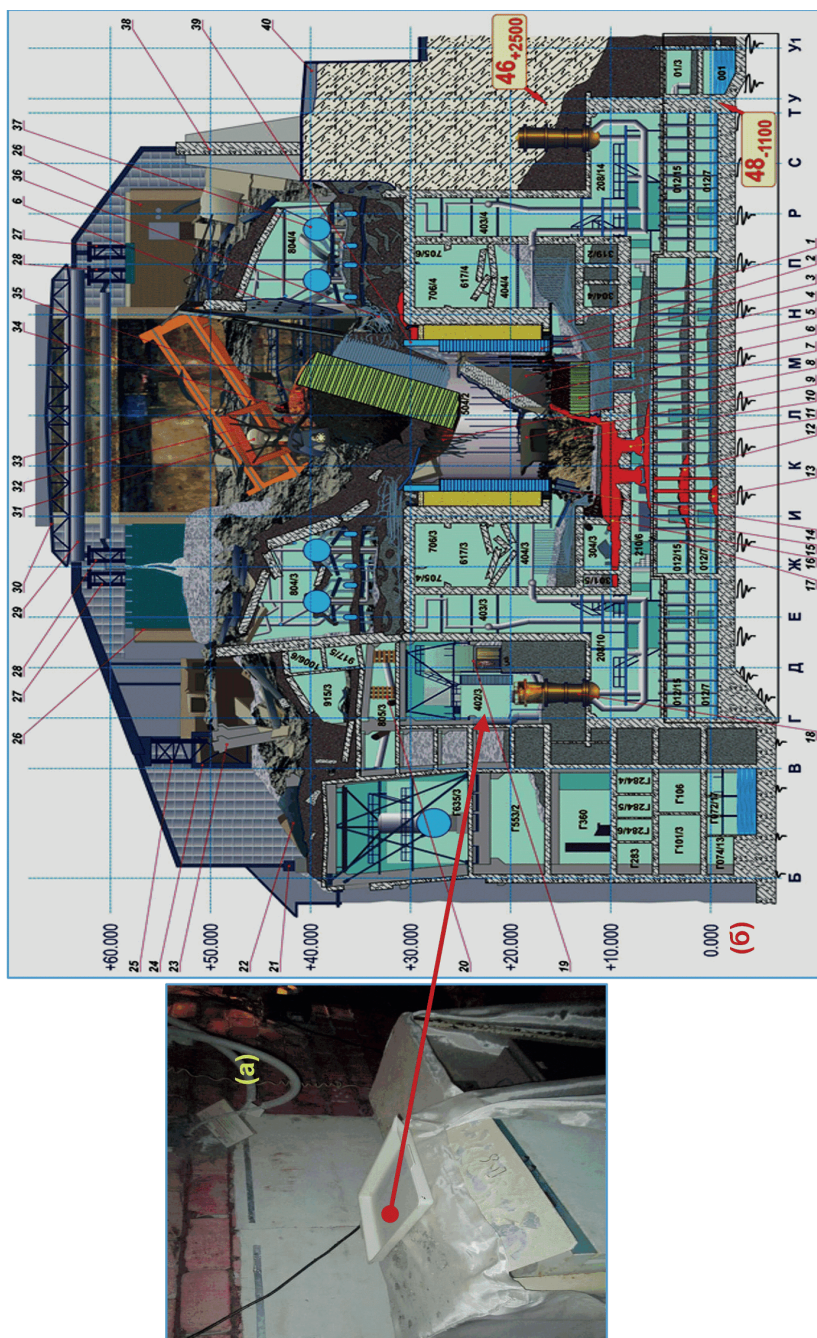


Рис. 3.31 — Контроль радиоактивных выпадень у прим. 402/3:  
 а — кювета з фільтрувальним матеріалом; б — розташування на схемі об'єкта «Укриття»  
 точки контролю выпадень у прим. 402/3



Після введення НБК в експлуатацію (рис. 3.29 [87]) динаміка об'ємної активності  $\Sigma\beta$  в системі «байпас» носить сталий характер (у 2020 році — 0,2...0,33 Бк/м<sup>3</sup>), а її тренд зміщується в бік мінімальних значень. Звернемо увагу на збільшення внеску конденсаційного  $^{137}\text{Cs}$  до загальної активності, що зумовлено значною кількістю будівельного пилу, який утворився під час зведення огорожувального контуру та внутрішніх робіт у НБК. АМАД частинок-носіїв  $^{137}\text{Cs}$  становив від 4 до 14 мкм, а частинок-носіїв  $^{241}\text{Am}$  — від 4 до 6 мкм [100].

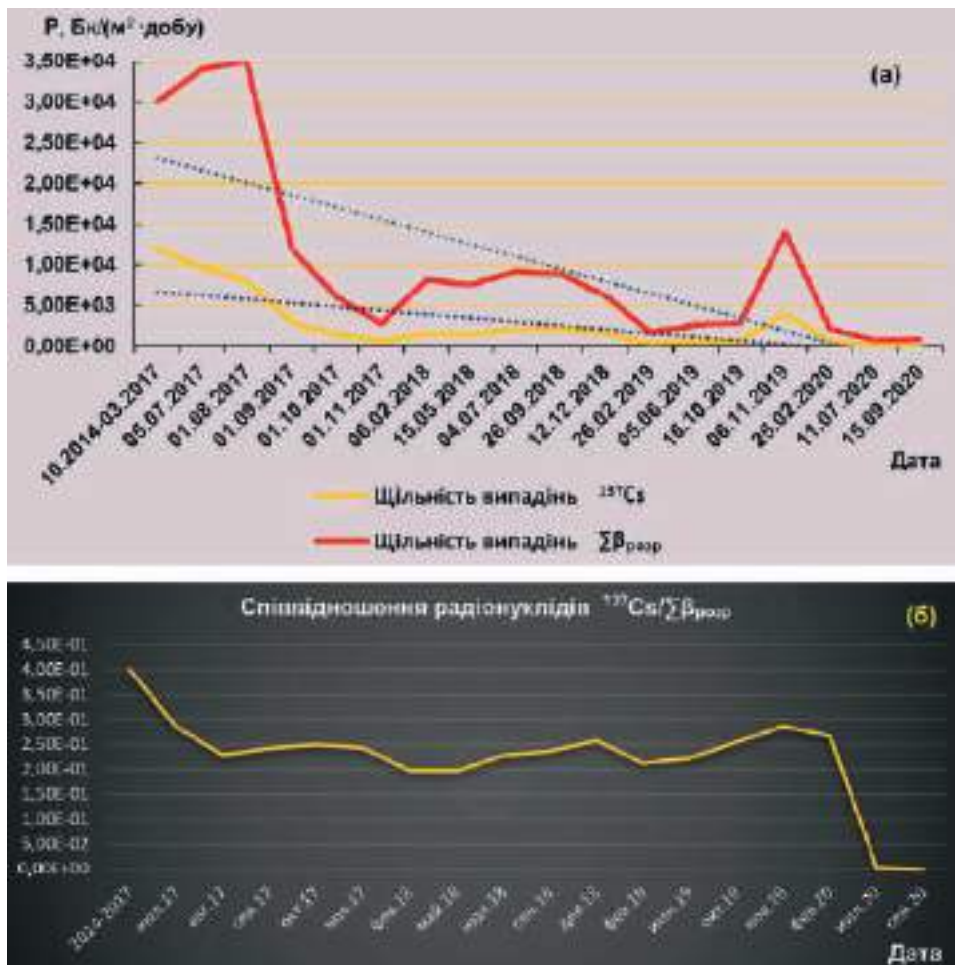


Рис. 3.32 — Характеристика радіоактивних випадінь у прим. 402/3:

а —  $^{137}\text{Cs}$  та  $\Sigma\beta$ ; б —  $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$



---

Щоб оцінити утворення незакріпленого радіоактивного пилу в підпокрівельному і міжконтрфорсному просторах, для контролю активності й складу радіонуклідів аерозольних випадінь у підпокрівельному просторі об'єкта «Укриття» в точках контролю встановили два осаджувальних планшети: один — на південно-східному розі західної опори балки «Мамонт», позначка 43.000 м, вісь 50, ряд В, прим. 2007/3 (рис. 3.29); інший — в міжконтрфорсному просторі. За результатами контролю, щільність випадінь РА в підпокрівельному просторі об'єкта «Укриття» в 2017—2019 роках знизилась у декілька разів порівняно з початком спостережень (18.07.2014) [100]. Різкі підвищення активності та збагачення аерозолів конденсаційним цезієм у 2016—2017 роках (рис. 3.30) спричинено значним пилопідйомом під час герметизації арки НБК. Для порівняння характеру поведінки РА у приміщеннях об'єкта «Укриття» (рис. 3.31) наведемо дані щільності випадінь у прим. 402/3 [100].

Після встановлення НБК щільність випадінь у підпокрівельному просторі об'єкта «Укриття» по основних нуклідах (див. рис. 3.30) знизилась на кілька порядків. Співвідношення концентрацій радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{241}\text{Am}$  в пробах аерозольних випадінь значно перевищує (73 %) цей показник у базовому складі палива, що свідчить про збагачення  $^{137}\text{Cs}$  через його привнесення з інших джерел РА. При середньорічній щільності випадіння  $\Sigma\beta$ -випромінювачів  $6,1 \cdot 10^{-4}$  Бк/(м<sup>2</sup> · с) поверхнєве забруднення, що знімається в точці контролю, без урахування природного розпаду радіонуклідів, зростає за рік на 58 част./(см<sup>2</sup> · хв). Той самий характер щільності випадінь (рис. 3.32) спостерігаємо і в прим. 402/3: різке зниження активності РА при значущому збагаченні  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$ . Проте співвідношення концентрацій радіонуклідів у випадіннях в прим. 402/3 стало й близьке до паливного. Окремі значні підвищення активності РА спричинені будівельно-монтажними роботами чи обрушенням фрагментів конструкцій об'єкта «Укриття» через руйнування їх з часом.

### **3.2.3 Радіоактивні аерозолі в повітряному середовищі нового безпечного конфайнмента**

Регулярний контроль радіоактивних аерозолів, що виносяться через технологічні отвори й нещільності легкої покрівлі з об'єкта «Укриття» в основний об'єм НБК, ведеться з 1998 року та здійснюється за допомогою акумулюючих планшетів, які встановлені над технологічними люками (рис. 3.33) [98].

Аналізуючи динаміку неорганізованого річного викиду  $\Sigma\beta$ -нуклідів крізь технологічні отвори й нещільності легкої покрівлі об'єкта «Укриття» у 1998—2020 роках на верхніх позначках об'єкта «Укриття» (рис. 3.34), можна виділити чотири характерні періоди.

Період 1. 1998—2003 роки: експлуатація третього енергоблока Чорнобильської АЕС, робота системи пилопригнічення лише над центральним залом; середній викид  $\Sigma\beta$  — від 696 до 1184 МБк/рік.



Рис. 3.33 — Характеристика місця встановлення сорбуючого планшета:  
 а — зовнішній вигляд основного об'єму НБК; б — сорбуючий планшет, встановлений на  
 легкій покрівлі об'єкта «Укриття»; в — загальний вигляд легкої покрівлі об'єкта «Укриття»  
 з установленим планшетом

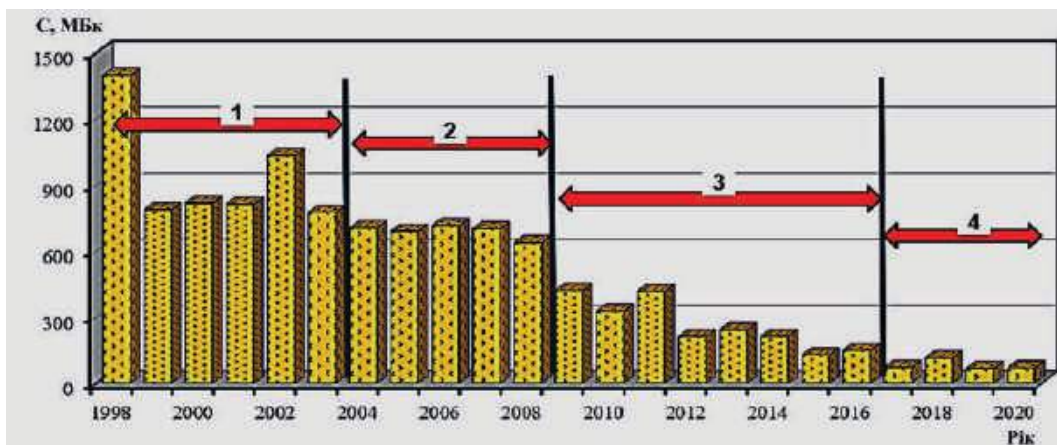


Рис. 3.34 — Динаміка викиду  $\Sigma\beta$ -активних нуклідів на верхніх позначках крізь нещільності  
 в покрівлі об'єкта «Укриття», 1998—2020 роки

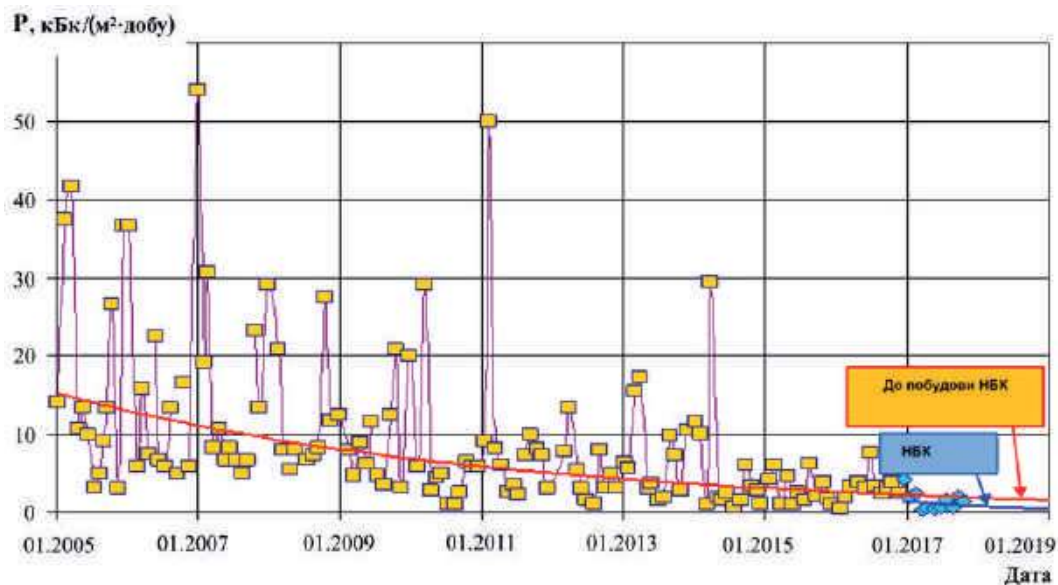


Рис. 3.35 — Динаміка середньодобової швидкості викидів  $\Sigma\beta$  крізь нещільності на верхніх позначках об'єкта «Укриття», 2005—2019 роки



Рис. 3.36 — Динаміка швидкості осадження  $\Sigma\beta$ -випромінюючих нуклідів на покрівлю об'єкта «Укриття», 2016—2018 роки

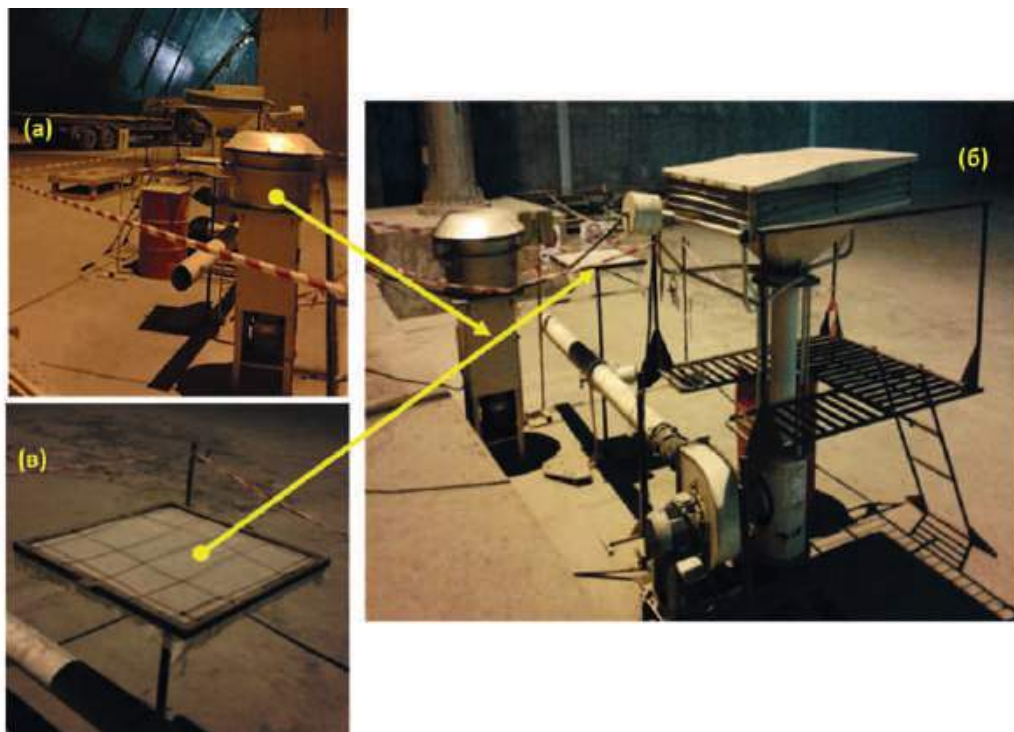


Рис. 3.37 — Обладнання для моніторингу об'ємної активності, радіонуклідного, дисперсного складу аерозолю та щільності радіоактивних випадіннь у приземному шарі повітряного середовища в основному об'ємі НБК:

а — зовнішній вигляд ФБУ «Grad-1.8» під НБК;

б — зовнішній вигляд імпактора «Andersen»; в — осаджувальний планшет

Період 2. 2004—2008 роки: створення та введення в експлуатацію модернізованої системи пилопригнічення, герметизація покрівлі об'єкта «Укриття», провадження активної діяльності в його приміщеннях, пов'язаної зі стабілізаційними заходами; середній викид  $\Sigma\beta$  — від 659 до 721 МБк/рік.

Період 3. 2009—2016 роки: бетонування фундаменту під НБК та зведення самого НБК; будівництво допоміжних приміщень комплексу НБК; спорудження НВТ (2011) і демонтаж ВТ-2 (2013); демонтаж окремих будівельних конструкцій об'єкта «Укриття» (2015); спорудження західної та східної стін огорожувального контуру НБК (2016) тощо; встановлення арки НБК в проектне положення; середній викид  $\Sigma\beta$  — від 152 до 378 МБк/рік, що понад як утричі менше порівняно з періодом 1; мінімальний викид — 128 МБк (зафіксовано 2015 року).



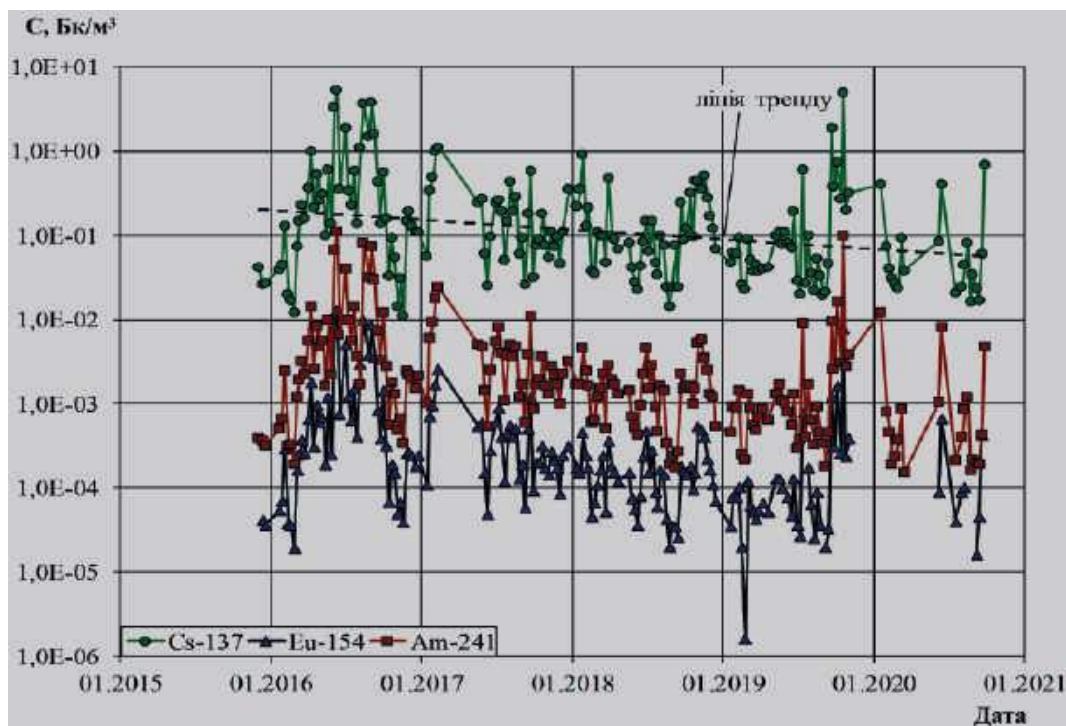


Рис. 3.38 — Динаміка об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$  та  $^{241}\text{Am}$  під аркою НБК (дані ФВУ «Grad-1.8»), грудень 2015 — вересень 2020 року

Динаміка середньодобової швидкості неорганізованих викидів  $\Sigma\beta$ -нуклідів через нещільності на верхніх позначках об'єкта «Укриття» протягом 14 років спостережень наведена на рис. 3.35.

Період 4. 2017—2020 роки; з введенням в експлуатацію НБК викид РА в основний об'єм НБК зменшився понад як удесятеро порівняно з періодом 1, хоча в цей час виконувались інтенсивні будівельні роботи з герметизації НБК та введення його в експлуатацію, які супроводжувались значним пилопідйомом. За інтегральною оцінкою викиду, сума  $\alpha$ - та  $\beta$ -випромінюючих нуклідів у викидах знизилась майже утричі (51 МБк). На стільки ж зменшилась і швидкість викидів у основний об'єм НБК, яка має тенденцію до поступового зниження.

Із введенням НБК в експлуатацію змінився простір розсіювання РА, зараз він обмежений герметичною конструкцією арки. Випадіння в основному об'ємі НБК формується осіданням радіоактивних частинок аерозолі, що виносяться крізь легку покрівлю об'єкта «Укриття», та осіданням інертного пилу внаслідок вторинного

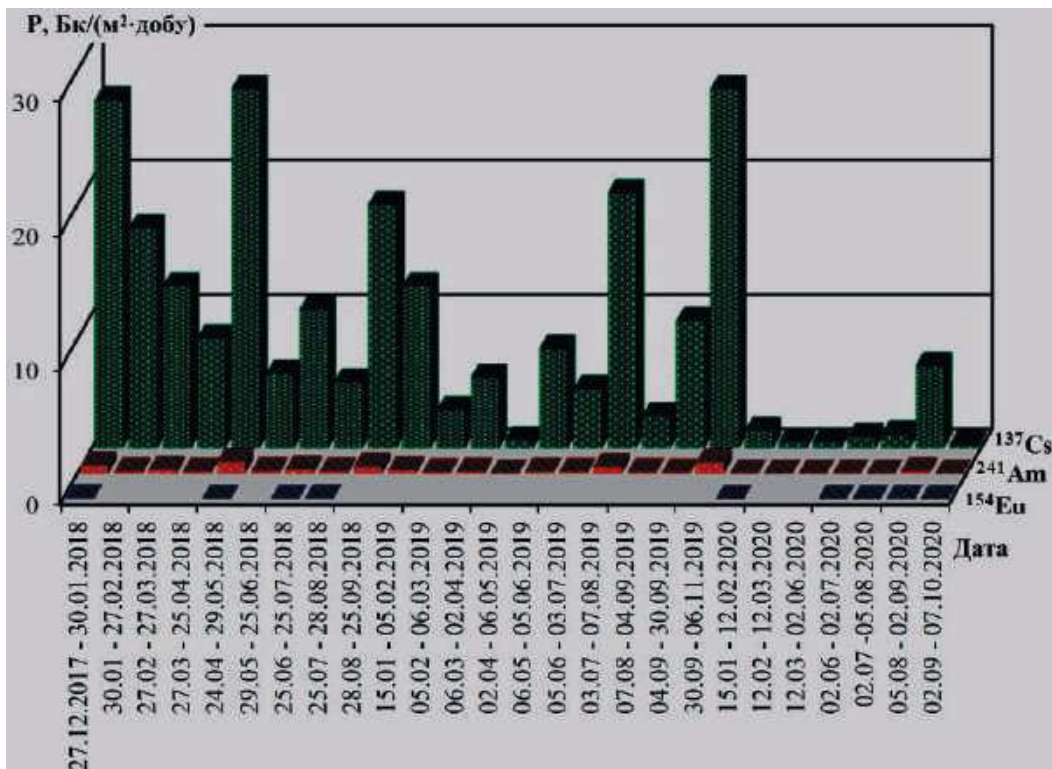


Рис. 3.39 — Динаміка щільності випадінь радіонуклідів на підстилаючу поверхню біля південної стіни машинного залу четвертого енергоблока Чорнобильської АЕС, грудень 2015 — жовтень 2020 року

пиліопідйому у процесі технологічної діяльності та демонтажу конструкцій в окремих приміщеннях об'єкта «Укриття» (наприклад, під час введення в серпні 2018 року в експлуатацію вентиляційної системи НБК).

Середня щільність випадіння суми  $\Sigma\beta$ -випромінюючих нуклідів збільшилась порівняно з 2014 роком майже вдвічі (рис. 3.36). Останніми роками спостерігається значне осідання саме інертного пилу, його вже помітно на внутрішніх поверхнях НБК неозброєним оком.

Радіоактивні аерозолі в приземному шарі повітряного середовища основного об'єму НБК формуються РА, що виносяться крізь нещільності об'єкта «Укриття», та РА, що сформувалися в основному об'ємі НБК під час будівельно-монтажних робіт з герметизації арки НБК, а особливо в процесі створення огорожувального контуру.

---

---

Моніторинг об'ємної активності, радіонуклідного та дисперсного складу аерозолі і щільності випадін у приземному шарі повітряного середовища в основному об'ємі НБК (рис. 3.37) є важливим видом контролю, який дає змогу оцінити дозові навантаження на персонал, що виконує роботи в НБК.

Об'ємну активність радіонуклідного та дисперсного складу аерозолі повітряного середовища під НБК контролюють фільтровентиляційною установкою ФБУ «Grad-1.8» (див. рис. 3.37, а); дисперсний склад аерозолі в приземному шарі повітря під НБК — імпактором «ANDERSEN» продуктивністю 1650 м<sup>3</sup>/добу (див. рис. 3.37, б) для п'яти діапазонів AMAD: до 0,8 мкм; 0,8—1,4 мкм; 1,4—2,3 мкм; 2,3—4,9 мкм; 4,9—10,0 мкм. Періодичність відбору — двічі на місяць.

Щільність випадін на підстилаючу поверхню під НБК контролюють за допомогою горизонтальних осаджувальних планшетів. Тривалість експозиції — один місяць.

Аналіз отриманих даних показав (рис. 3.38), що у 2016—2018 роках, які супроводжувались інтенсивним пилопідйомом (роботи з герметизації арки НБК та створення огорожувального контуру), зафіксована найбільша об'ємна активність <sup>137</sup>Cs в повітряному середовищі під НБК — до 3 Бк/м<sup>3</sup> у 2016 році [99, 101, 102].

Станом на 2020 рік тренд об'ємної активності йде до сталого її зменшення до 0,1 Бк/м<sup>3</sup>. У 2018—2020 роках AMAD становив для частинок-носіїв <sup>137</sup>Cs від 1,2 до 4,3 мкм, для частинок-носіїв <sup>241</sup>Am — від 1,3 до 5,0 мкм [100].

Динаміку щільності випадін радіонуклідів на підстилаючу поверхню під НБК наведено на рис. 3.39. За весь період спостережень щільність випадін <sup>137</sup>Cs коливалася в діапазоні від 0,3 до 1,1 · 10<sup>3</sup> Бк/(м<sup>2</sup> · добу).

Висока щільність випадін в основному об'ємі НБК пов'язана, найімовірніше, з осіданням будівельного пилу, який накопичувався під час робіт з герметизації НБК, а особливо робіт зі створення огорожувального контуру НБК. Загальна щорічна активність випадін <sup>137</sup>Cs під НБК, з огляду на велику площу підстилаючої поверхні в основному об'ємі НБК, може становити тисячі магабеккерелів, отже, потрібні додаткові дослідження цього параметра.

### **3.2.4 Радіоактивні аерозолі як засіб неоперативного контролю стану паливовмісних матеріалів**

Недостатність даних у різних джерелах інформації про фізико-хімічні властивості ПВМ унеможливорює повну оцінку характеристик, які визначають стійкість ПВМ до умов оточуючого середовища, а також прогнозування їх поведінки в майбутньому. Але контроль параметрів, що опосередковано міститимуть відомості про їхній стан, можна реалізувати вже сьогодні. З огляду на наявні знання виділимо основні процеси деградації ПВМ з утворенням радіоактивного пилу:

генерація паливного пилу з поверхні ЛПВМ внаслідок спонтанного пилоутворення;

утворення дрібних фракцій через еволюцію ЛПВМ в результаті фізико-хімічних процесів, які протікають в них після аварії, зокрема процесів кристалізації;

деструкція ЛПВМ через зміну умов оточуючого середовища (температура, вологість).

Аналіз відібраних з поверхні ЛПВМ зразків пилу показав прямий зв'язок радіонуклідного складу (співвідношень активності нуклідів  $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ ,  $^{241}\text{Am}/^{238}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}/^{154}\text{Eu}$ ,  $^{90}\text{Sr}/^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$ ) з відповідними співвідношеннями в скупченні ЛПВМ [56], що свідчить про генерацію РА саме цим скупченням, а значення об'ємної активності говорять про ступінь деструкції. Дисперсний аналіз і присутність частинок, розміри яких змінювались від одиниць до сотень мікронів, вказують на руйнування ЛПВМ та можливість утворення радіоактивного пилу. Сумарне річне пилоутворення в об'єкті «Укриття» через руйнування ЛПВМ, при розумних припущеннях щодо площі їх поверхні, дає близько  $7 \cdot 10^{11}$  Бк та  $4 \cdot 10^{13}$  Бк за  $\alpha$ - та  $\beta$ -активністю відповідно. Перерахунок на питому активність ЛПВМ показує, що щороку в об'єкті «Укриття» на пил перетворюються не менш як декілька десятків кілограмів палива [56].

Більшість ЛПВМ являють собою відкриті скупчення, поверхня яких досить неоднорідна, часом вкрита тріщинами та складається з окремих фрагментів (наприклад, у прим. 304/3). За результатами моделювання з урахуванням неоднорідності структури скупчень площа відкритих поверхонь скупчень ЛПВМ становить не менше ніж  $1500 \text{ м}^2$  [56, 103].

**Таблиця 3.7 — Основні вихідні дані та результати розрахунку площі поверхонь відкритих скупчень ЛПВМ у приміщеннях об'єкта «Укриття» [103]**

Номер приміщення	Структура поверхні	Площа відкритої поверхні, $\text{м}^2$
012-7	Середній розмір окремих спечених фрагментів «шлаку» — 50 мм. Розмір каверн — 0,1...0,2 мм. Спостерігаються великі каверни діаметром до 2—3 мм	$12,2 \pm 1,4$
012-15	Структура скупчення — система пов'язаних один з одним гребенів з провалами між ними 10—30 см завглибшки. Середній розмір окремих спечених фрагментів «шлаку» — 50 мм. Структура каверн ЛПВМ така сама, як у прим. 012/7	$92,7 \pm 16,2$
210-7	Матова кераміка пронизана великими газовими порожнинами, присутні рівномірно розподілені по об'єму лави металеві глобули правильної форми від 2,5 мм до 1 мкм	$82,3 \pm 17$
304-3	Вся поверхня ЛПВМ являє собою частково спечені фрагменти розміром від 1 до 20 см. Середній розмір шматків 10 см, шматки залиті до половини відносно щільним шаром лави. Текстура зразка чорної ЛПВМ — каверни з максимальним розміром до 1,8 мм. Містяться непрозорі частинки графіту розміром до 2 мм	$312 \pm 38$



Контроль РА в безпосередній близькості до ЛПВМ проводять з 2010 року в приміщеннях об'єкта «Укриття» на різних висотних позначках (табл. 3.7) [100, 104—109]. Аерозолі відбирають за допомогою відбірника типу RadeCo H810 протягом однієї-двох діб зі швидкістю, яка забезпечує прокачування 100—250 м<sup>3</sup> повітря за час експозиції. Для цього використовують пакети, що складаються з фільтрів АФА РСР-20 і АФА РМР-20 площею 20 см<sup>2</sup>. Аерозольні частинки відбирають та класифікують за розмірами п'ятикаскадним імпактором ІБФ-5К. Цей пристрій сортує аерозольні частинки по п'яти діапазонах АМAD: до 0,5 мкм; 0,5—1,2 мкм; 1,2—3,7 мкм; 3,7—8,5 мкм; 8,5—17,0 мкм. Повніше вловлювати аерозолі субмікронного розміру (до 0,5 мкм) допомагає тонкодисперсний фільтр.

Приміщення 012/7. Проби аерозолу в прим. 012/7 відбирали на двошарові пакети фільтрів АФА в безпосередній близькості (коло 0,5 м) від скупчення ЛПВМ (рис. 3.40, а). Пробовідбірну апаратуру розміщували на спеціальному дистанційному пристрої (рис. 3.40, б). Додатково, для контролю дисперсності, здійснювали відбір проб РА на імпактор (рис. 3.40, в). Динаміку активності <sup>137</sup>Cs та  $\Sigma\beta$  в прим. 012/7 у 2011—2020 роках наведено на рис. 3.41 і 3.42.



Рис. 3.40 — Приміщення 012/7 об'єкта «Укриття»:

- а — просторове розташування скупчення ЛПВМ;
- б — вигляд скупчення ЛПВМ;
- в — відбір проб радіоактивних аерозолів на пакет двошарових фільтрів

Аналіз отриманих даних показав, що з побудовою НБК концентрація  $^{137}\text{Cs}$  та  $\Sigma\beta$ -нуклідів у повітрі прим. 012/7 знизилась у десятки разів (рис. 3.41) і має сталу тенденцію до зниження. Окремі підвищення значень цих параметрів у 2017—2019 роках є наслідком проведення будівельно-монтажних робіт з герметизації НБК та зведення огорожувального контуру, які супроводжувались значним пилопідйомом.

Як і до побудови НБК, співвідношення концентрацій радіонуклідів у пробах аерозолі та в ЛПВМ з цього приміщення мають близькі значення. Це вказує на те, що РА, які спостерігаються в прим. 012/7, генеруються розташованим саме тут скупченнями ЛПВМ через його деградацію [65, 110]. Окремо зазначимо помітне зростання збагачення РА конденсаційними  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  (рис. 3.42). Це зумовлено генерацією пилу поверхнями донних відкладень, що відкрилися через висихання радіоактивно забруднених водних скупчень, для яких середнє співвідношення активностей  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{241}\text{Am}$  у воді становить близько 170.

Результати вимірювань дисперсності РА за 2010—2020 роки показали, що до побудови НБК, в 2010—2011 роках, найчастіше носіями  $\Sigma\beta$  були частинки з AMAD від 2 до 8 мкм [100, 104, 107]. Після введення НБК в експлуатацію дисперсний склад аерозолі не зазнав істотних змін. Дані спостережень за 2014—2020 роки наведено в табл. 3.8 та на рис. 3.43.

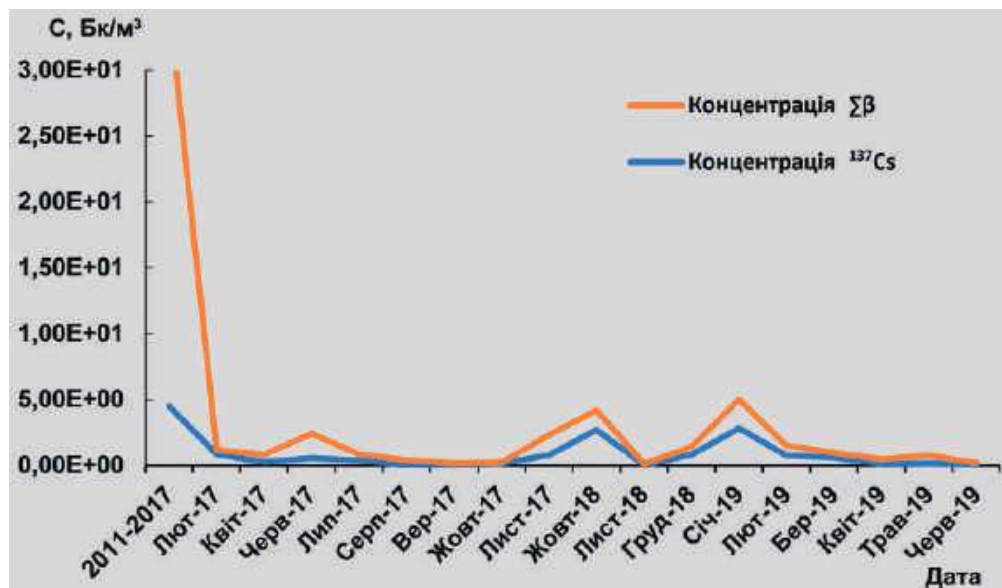


Рис. 3.41 — Динаміка об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$ ,  $\Sigma\beta$  в прим. 012/7 об'єкта «Укриття», 2010—2020 роки

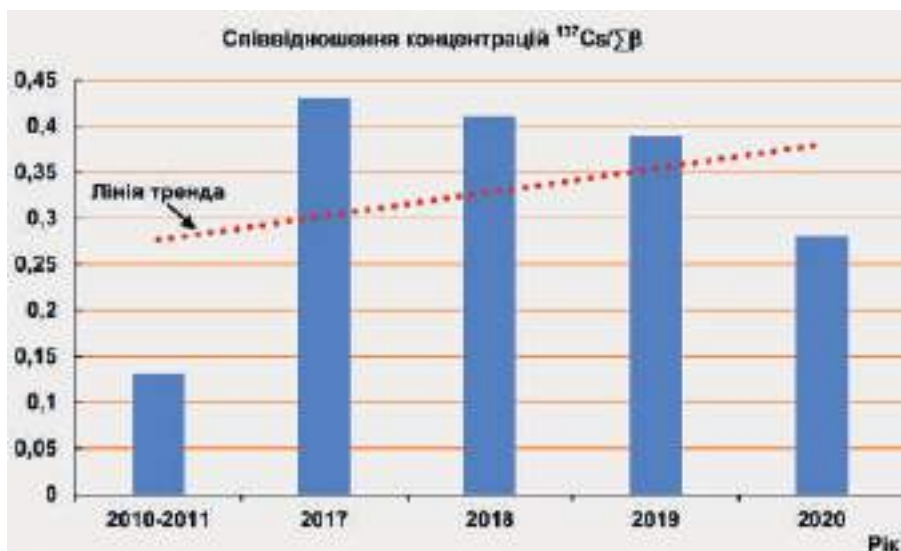


Рис. 3.42 — Динаміка співвідношення об'ємних активностей  $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$  в прим. 012/7 об'єкта «Укриття», 2010—2020 роки

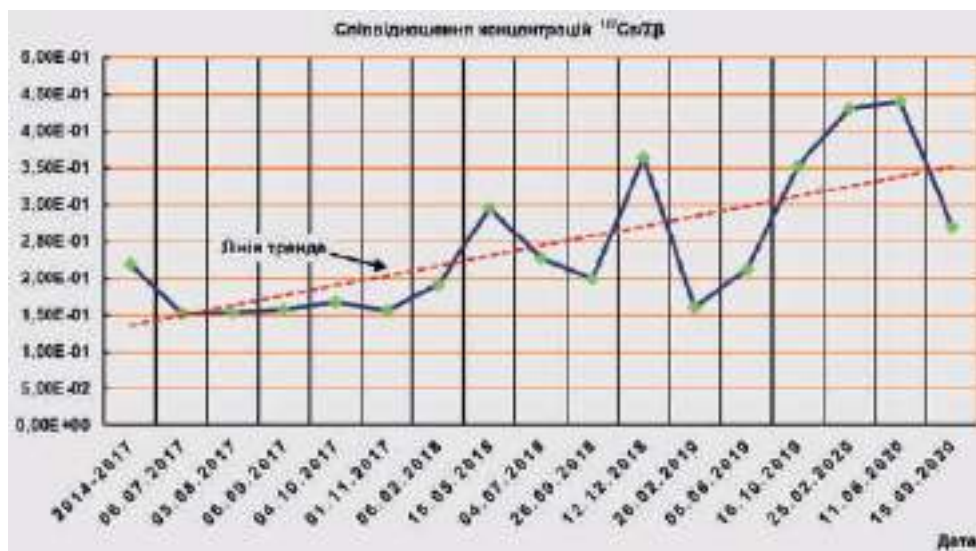


Рис. 3.43 — Динаміка співвідношення активностей  $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$  в щільності випадінь прим. 012/7

Таблиця 3.8 — Щільність випадінь  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ , і  $^{241}\text{Am}$  в прим. 012/7, 2014—2020 роки

Рік	Середня по роках щільність випадінь радіонуклідів, Бк/(м <sup>2</sup> · доба)			
	$^{137}\text{Cs}$	$^{154}\text{Eu}$	$^{241}\text{Am}$	$\Sigma\beta$
2014—2017	6,58E+02	7,81E+00	6,73E+01	4,19E+03
2018	9,05E+01	7,70E-01	7,10E+00	4,58E+02
2019	9,20E+00	1,20E-01	5,10E-01	3,37E+01
2020	9,95E+00	6,20E-02	3,90E-01	2,90E+01

З побудовою НБК об'ємна активність і щільність випадінь РА знизились майже на два порядки, що зумовлено, ймовірно, зменшенням швидкості повітряних потоків, які призводять до вторинного пилопідйому. Співвідношення концентрацій радіонуклідів у пробах РА та випадіннях відповідають аналогічним співвідношенням для ЛПВМ у скупченні прим. 012/7 [100, 104, 107]; отже, джерелом їх є генерація з ЛПВМ прим. 012/7.

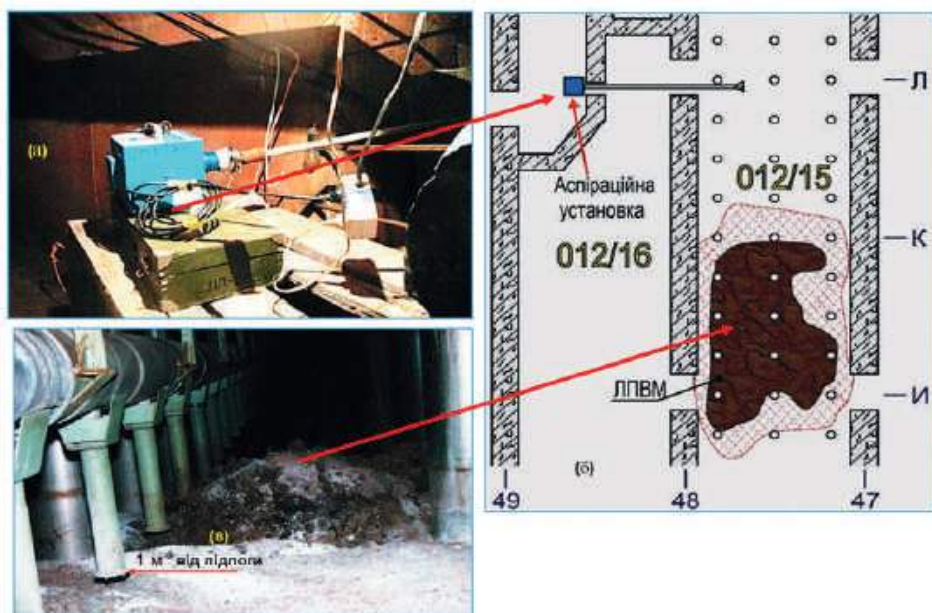


Рис. 3.44 — Розташування апаратури відбору проб РА у прим. 012/16 та ЛПВМ у прим. 012/5:  
 а — розташування апаратури відбору проб РА у прим. 012/16;  
 б — скупчення ЛПВМ у прим. 012/15 на схемі просторового розташування;  
 в — фотографія скупчення ЛПВМ у прим. 012/15



Приміщення 012/15. Після введення НБК в експлуатацію, починаючи з 2017 року помітним стає збагачення радіоактивних аерозолів  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  внаслідок привнесення активності з інших джерел. Дисперсний склад не зазнав помітних змін; він, як і раніше, визначається наявністю частинок розміром 2—8 мкм. Відбір проб аерозолію в прим. 012/15 здійснюється на двох шарові пакети фільтрів АФА або імпактор у безпосередній близькості від скупченням ЛПВМ (рис. 3.44). Пробовідбірна апаратура розміщалась у прим. 012/16. Динаміка об'ємних активностей  $^{137}\text{Cs}$ ,  $\Sigma\beta$  та їх співвідношення  $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$  у випадіннях прим. 012/7 у 2017—2020 роках наведена на рис. 3.45 [100, 105, 108].

З побудовою НБК концентрація  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі прим. 012/15 суттєво не змінилась і становить у середньому 0,4 Бк/м<sup>3</sup>. Сталий рівень зберігають такі параметри, як  $\Sigma\beta$  та  $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$ , за винятком різкого підвищення їх 2018 року через техногенну діяльність, що не впливає на загальний тренд. Дисперсний склад визначається, як і раніше, носіями  $\Sigma\beta$  з AMAD від 0,8 до 4 мкм. Співвідношення концентрацій радіонуклідів у РА відповідають матеріальному складу скупчення ЛПВМ в цьому приміщенні та є продуктом їх деструкції.

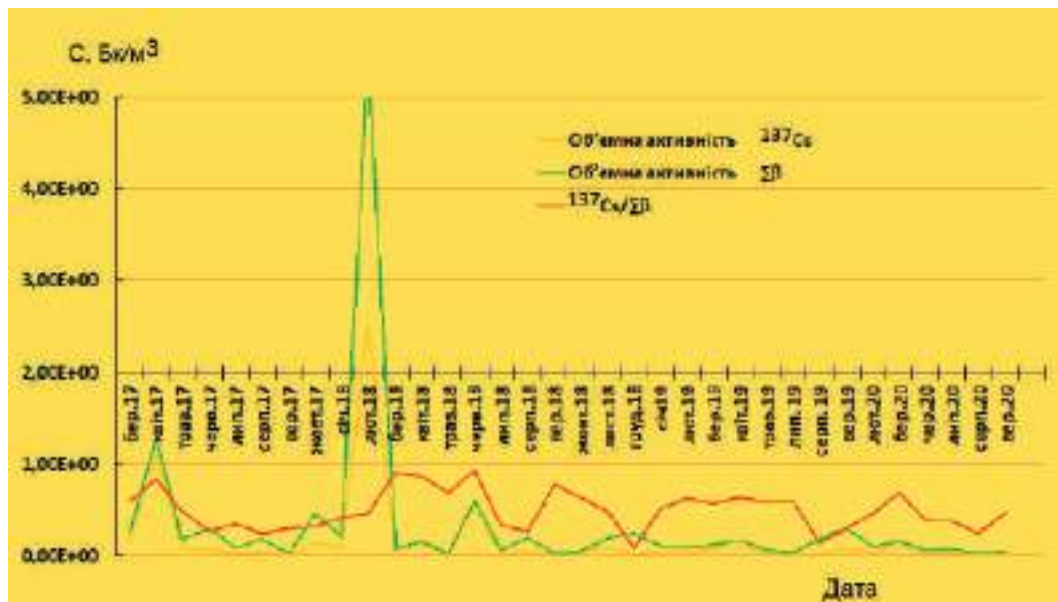


Рис. 3.45 — Динаміка об'ємних активностей  $^{137}\text{Cs}$ ,  $\Sigma\beta$  та співвідношення їх ( $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$ ) в щільності випадіннь у прим. 012/7, 2017—2020 роки

Приміщення 210/7. Проби аерозолю в прим. 210/7 відбирали на двошарові пакети фільтрів АФА та імпактор у безпосередній близькості від скупчення ЛПВМ (рис. 3.46, а, б) [100, 106, 109]. Пробовідбірну апаратуру розміщали в прим. 208/12 (рис. 3.46, в).

Динаміку щільності випадінь радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$ ,  $\Sigma\beta$  та їх співвідношення ( $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$ ) в прим. 210/7 у 2017—2020 роках наведено на рис. 3.47, усереднену за рік щільність випадінь радіонуклідів та їх основні співвідношення — в табл. 3.9.

На підставі отриманих даних можна констатувати, що концентрація  $^{137}\text{Cs}$  та  $\Sigma\beta$ -випромінюючих нуклідів у повітрі прим. 210/7 знизилась майже на порядок при сталому співвідношенні концентрацій  $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$ . Значні викиди в 2018 і 2019 роках, як зазначалось раніше, пов'язані з техногенною діяльністю і не впливають на загальний тренд до її зменшення. Дисперсний склад визначається, як і 2013 року, носіями  $\Sigma\beta$  з AMAD від 0,8 до 4 мкм. Співвідношення концентрацій радіонуклідів в аерозолях

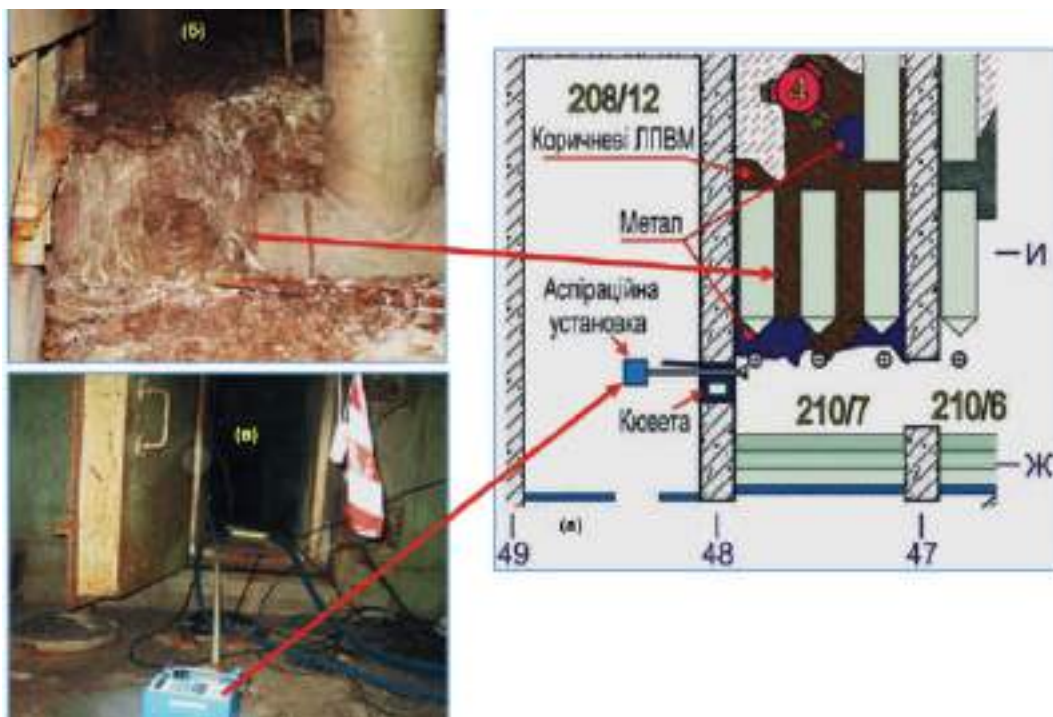


Рис. 3.46 — Розташування скупчення ЛПВМ та апаратури відбору проб РА у прим. 210/7:  
а — фотографія скупчення ЛПВМ у прим. 210/7; б — схема приміщень 208/12, 210/6 та 210/7 з ЛПВМ; в — розміщення апаратури відбору проб у прим. 208/12

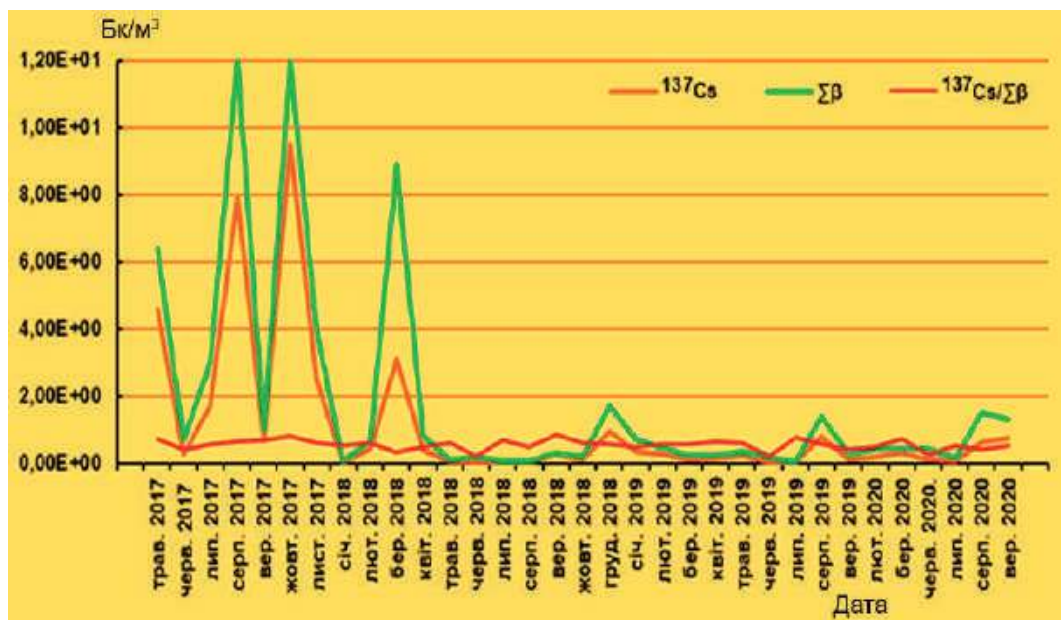


Рис. 3.47 — Динаміка щільності випадіння радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$ ,  $\Sigma\beta$  та їх співвідношення ( $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$ ) в прим. 210/7, 2017—2020 роки

відповідають матеріальному складу ЛПВМ у цьому приміщенні і є продуктом деструкції їх. У пробах РА майже вдвічі зросла активність  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$ , що є результатом деструкції поверхонь, на які раніше осідали частинки конденсаційного походження [100].

Таблиця 3.9 — Усереднена за рік щільність випадіння радіонуклідів та їх основні співвідношення в прим. 210/7, 2014—2020 роки

Рік	Середня за рік щільність випадіння радіонуклідів, Бк/(м <sup>2</sup> · рік)				Співвідношення радіонуклідів у щільності випадіння		
	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{241}\text{Am}$	$\Sigma\beta$	$^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$	$^{90}\text{Sr}/^{241}\text{Am}$	$^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$
2014—2017	2,10E+02	6,50E+01	2,80E+00	3,60E+02	7,50E+01	2,32E+01	5,83E-01
2017	2,70E+02	1,40E+02	6,16E+00	5,97E+02	4,38E+01	2,27E+01	4,52E-01
2018	1,61E+02	1,25E+02	4,22E+00	3,78E+02	3,82E+01	2,96E+01	4,26E-01
2019	2,90E+01	—	8,20E-01	7,00E+01	3,54E+01	—	4,14E-01
2020	3,00E+01	—	8,15E-01	6,90E+01	3,68E+01	—	4,35E-01



Рис. 3.48 — Відбір проб радіоактивного аерозолю в прим. 304/3:  
 а — чорні ЛПВМ в прим. 304/3 (фото О. Купного);  
 б — розміщення апаратури пробовідбору в прим. 318/2

*Приміщення 304/3.* Проби аерозолю з прим. 304/3 відбирали через свердловину з прим. 308/2 [100] (рис. 3.48).

За результатами радіометричних і  $\gamma$ -спектрометричних вимірів концентрацій  $^{137}\text{Cs}$ ,  $\Sigma\beta$  та їх співвідношень у пробах аерозолю в 2017—2020 роках (рис. 3.49), аналізу дисперсності та співвідношень концентрацій основних радіонуклідів (табл. 3.10) можна констатувати, що з побудовою НБК концентрація  $^{137}\text{Cs}$  та  $\Sigma\beta$  в повітрі прим. 304/3 знизилась майже вп'ятеро при сталому співвідношенні концентрацій  $^{137}\text{Cs}/\Sigma\beta$ . Значні викиди в 2017 році пов'язані з техногенною діяльністю і не впливають на загальний тренд до зменшення її. Співвідношення концентрацій основних радіонуклідів у пробах аерозолю практично не змінилось. Це означає, що основним і єдиним джерелом РА в прим. 304/3 є деградація розташованих у ньому ЛПВМ.

Таблиця 3.10 — Співвідношення концентрацій радіонуклідів у пробах аерозолю з прим. 304/3

Дата	$^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$	$^{241}\text{Am}/^{238}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$	$^{90}\text{Sr}/^{241}\text{Am}$
01.03.2017	58	3,6	1,7	20
08.02.2018	44	3,5	1,5	21
17.04.2018	37	4,7	1,7	22



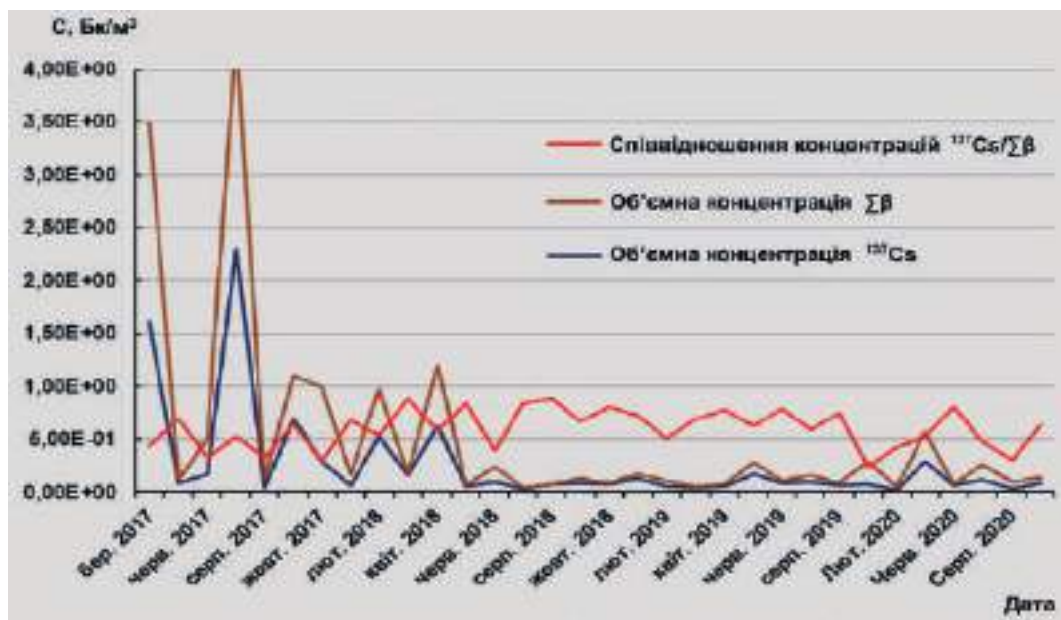


Рис. 3.49 — Динаміка об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  та співвідношення їх концентрацій у прим. 304/3, 2017—2020 роки

Загальні висновки з результатів контролю поведінки РА в безпосередній близькості від скупчень ЛПВМ такі:

спостерігається процес руйнування ЛПВМ і спонтанний перехід продуктів деградації в аерозольний стан;

після насування НБК на об'єкт «Укриття» змінюється волого-температурний режим; середньорічна об'ємна активність РА в повітрі приміщень, де є скупчення ЛПВМ, різко знизилась;

змінюється радіонуклідний склад аерозолі; як і раніше, проходять процеси деградації ЛПВМ і генерація РА з паливною складовою. Разом з цим помітним стає процес збагачення радіоактивних аерозолів  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  через генерацію з поверхонь висохлих донних відкладень водних скупчень, які раніше були в перелічених або сусідніх приміщеннях. Аналогічний характер носить формування аерозольних випадінь;

не з'ясованим залишається питання, як продукти руйнування ЛПВМ потрапляють у повітря за відсутності механічного впливу і вітрового перенесення (а саме в таких умовах і є ЛПВМ). Можна тільки припустити, що на генерацію аерозолів з поверхонь ЛПВМ впливають електростатичні заряди, які можуть виникати в процесі радіоактивного розпаду.

---

### 3.3 Радіоактивно забруднена вода в приміщеннях об'єкта «Укриття»

Досліджувати радіоактивну воду (РВ) почали відразу після побудови об'єкта «Укриття»: спочатку — епізодично, а з 1991 року — з певною періодичністю і дотепер.

До зведення НБК основними джерелами надходження води всередину об'єкта «Укриття» (в перші 10—15 років, за різними оцінками, — до 3000 м<sup>3</sup>/рік) були атмосферні опади та велика кількість техногенних розчинів.

Радіоактивно забруднена вода могла спричинити кілька видів небезпеки [111]: збільшення ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів у разі потрапляння на скупчення ПВМ; руйнацію ПВМ з подальшим неконтрольованим переміщенням радіоактивності по внутрішніх приміщеннях та виносом радіонуклідів за межі об'єкта «Укриття»; збільшення потенційної ядерної небезпеки об'єкта через перенесення розчинних солей збагаченого урану.

На нижніх позначках об'єкта «Укриття» виділили три джерела надходження води в приміщення [112]. Один з них техногенний — штатна система пилопригнічення: об'єм розчинів, які розпилюються в простір під покрівлею ЦЗ під час її роботи, дорівнював приблизно 200 м<sup>3</sup>/рік. Два інших джерела носили природний характер — це атмосферні опади (в середньому 1800—2000 м<sup>3</sup>/рік) і конденсат (майже 1600 м<sup>3</sup>/рік).

На той час вода поширювалась по об'єкту частково зруйнованими трубопроводами, трубними й кабельними проходками, люками, сходами, дверима, тріщинами і щілинами в міжповерхових перекриттях і стінах. За таких об'ємів можна було виділити навіть окремі гілки водних потоків (рис. 3.50).

Найбільше із скупчень РВ, які спостерігаються на цей час, міститься в прим. 001/3 (див. рис. 3.50) північної частини об'єкта «Укриття» (нижні позначки). За даними 1995—1997 років, сюди потрапляли потоки високоактивної води з басейну-барботера (80—90 м<sup>3</sup>/рік) і низькоактивні протікання (600—700 м<sup>3</sup>/рік) з боку каскадної стіни. У підсумку радіоактивна вода північного потоку та з-під каскадної стіни надходила у приміщення третього енергоблоку, звідки відкачувалась (до 700 м<sup>3</sup>/рік) і йшла на системи очищення (рис. 3.51).

Всі виявлені в межах об'єкта «Укриття» водні скупчення можна класифікувати як середньоактивні РРВ (від  $3,7 \cdot 10^8$  до  $3,7 \cdot 10^{13}$  Бк/м<sup>3</sup>), за винятком водного потоку зі свердловини в каскадній стіні — радіоактивна вода в ньому належить до категорії низькоактивних РРВ.

Різні модифікації паливовмісних матеріалів, розташованих на шляхах руху води в об'єкті «Укриття», по-різному впливають на її забруднення радіонуклідами. Дослідження 1995—1997 років показали, що основним джерелом забруднення «блочних» вод продуктами поділу та трансурановими елементами є окислені паливні частинки (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>). Швидкість їх розчинення набагато вища за той самий показник слабоокислених паливних частинок (UO<sub>2</sub>) і ЛПВМ.





Рис. 3.51 — Радіоактивна вода, що перетікає в приміщення третього енергоблока Чорнобильської АЕС [113]

склад РВ, зокрема об'ємні активності продуктів поділу ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) і трансуранових елементів ( $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ), урану, компонентів  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ , водневий показник (pH).

Встановлено, що розчинні та колоїдні форми радіонуклідів переносяться водотоками на нижні позначки об'єкта «Укриття», коагулюють, осідають і утворюють високоактивні донні відкладення у водних скупченнях. Об'єм донних відкладень, наприклад у прим. 001/3, становить орієнтовно  $65 \text{ м}^3$ . Кількість колоїдних форм радіонуклідів і урану, що накопичилися на нижніх позначках об'єкта «Укриття», оцінено в роботі [111]:  $^{137}\text{Cs}$  —  $0,9 \cdot 10^{12} \text{ Бк/рік}$ ;  $^{90}\text{Sr}$  —  $0,2 \cdot 10^{12} \text{ Бк/рік}$ ; плутоній (всі ізотопи) —  $2,4 \cdot 10^8 \text{ Бк/рік}$ ; уран —  $270 \text{ г/рік}$ . Отримані дані дали впевненість у відсутності ядерної небезпеки, але постійний контроль за великими скупченнями залишився.

У донних відкладеннях містяться паливні частинки, які змиваються і механічно переносяться потоком води. Тому сама вода поки не становила ядерної небезпеки, проте не можна було стверджувати, що в разі потрапляння її в скупчення ПВМ за певних умов не станеться значного зростання  $K_{\text{еф}}$ .



Постало ще одне важливе на той час питання: чи виходить РВ за межі об'єкта «Укриття»? В описуваний період було проведено багато досліджень для зведення балансу надходження і випаровування води. Виявилося, щороку в об'єкт «Укриття» надходить приблизно на 1000 м<sup>3</sup> води більше ніж випаровується. Надлишок вологи міг перетікати з прим. 001/3 в приміщення третього енергоблока. Факт перетікання підтверджений прямими спостереженнями і дослідженнями за допомогою трасера. Проте величина похибок як у зведенні балансу, так і вимірах та оцінках перетікання води велика. Вона допускала інші, поки неконтрольовані виходи води у сотні кубометрів щороку, за межі реакторного блока, зокрема потрапляння РВ у ґрунтові води.

Протягом багатьох років важливими для безпеки об'єкта «Укриття» були зменшення кількості РВ, що потрапляє в його приміщення, організація постійного контролю її місцезнаходження, радіонуклідного складу, наявності розчинних подільних матеріалів і, за потреби, застосування активних контрзаходів, зокрема герметизація покрівлі (рис. 3.52). Закриття багатьох отворів у покрівлі машинного залу, деаераторній етажерці, закладення довгих щілин у похилих частинах покрівлі, що лежать з півночі та півдня від трубного накату, запобігло потраплянню води через них, але одночасно призвело до погіршення природної вентиляції об'єкта.

Для боротьби з конденсаційною вологою в 1996 році розробили відповідну програму (підігрів повітря в окремих приміщеннях, відновлення природної вентиляції тощо) і відразу приступили до її виконання. В результаті кількість конденсаційної вологи у внутрішніх приміщеннях об'єкта «Укриття» в 1996—2000 роках зменшилась. З-поміж вжитих заходів можна назвати організацію відкачки РВ з нижніх позначок машинного залу третього енергоблока Чорнобильської АЕС, «вимощення» навколо стін об'єкта «Укриття» для зменшення попадання всередину приміщень дощової води.



Рис. 3.52 — Заміна покриття легкої покрівлі об'єкта «Укриття»

Радіоактивна вода стала своєрідним маркером діагностики стану ПВМ. Протікаючи через приміщення об'єкта «Укриття», потоки води накопичуються в нижніх приміщеннях, де відбирають проби. На своєму шляху вони омивають різні скупчення ПВМ (зокрема, й не доступні з багатьох причин) з різним співвідношенням радіонуклідів, притаманним тільки певному скупченню ПВМ і, тим самим, несуть важливу інформацію про стан цих скупчень.

Після введення НБК в експлуатацію відбулися кардинальні зміни в поведінці РВ, які насамперед визначаються відсутністю надходження атмосферної вологи, значним зменшенням кількості пилопригнічувальних розчинів, підвищенням середньої температури в об'єкті «Укриття» і основному об'ємі НБК, зміною режиму вентиляції приміщень (рис. 3.53). Протягом 2016—2020 років щомісяця проводили візуальний

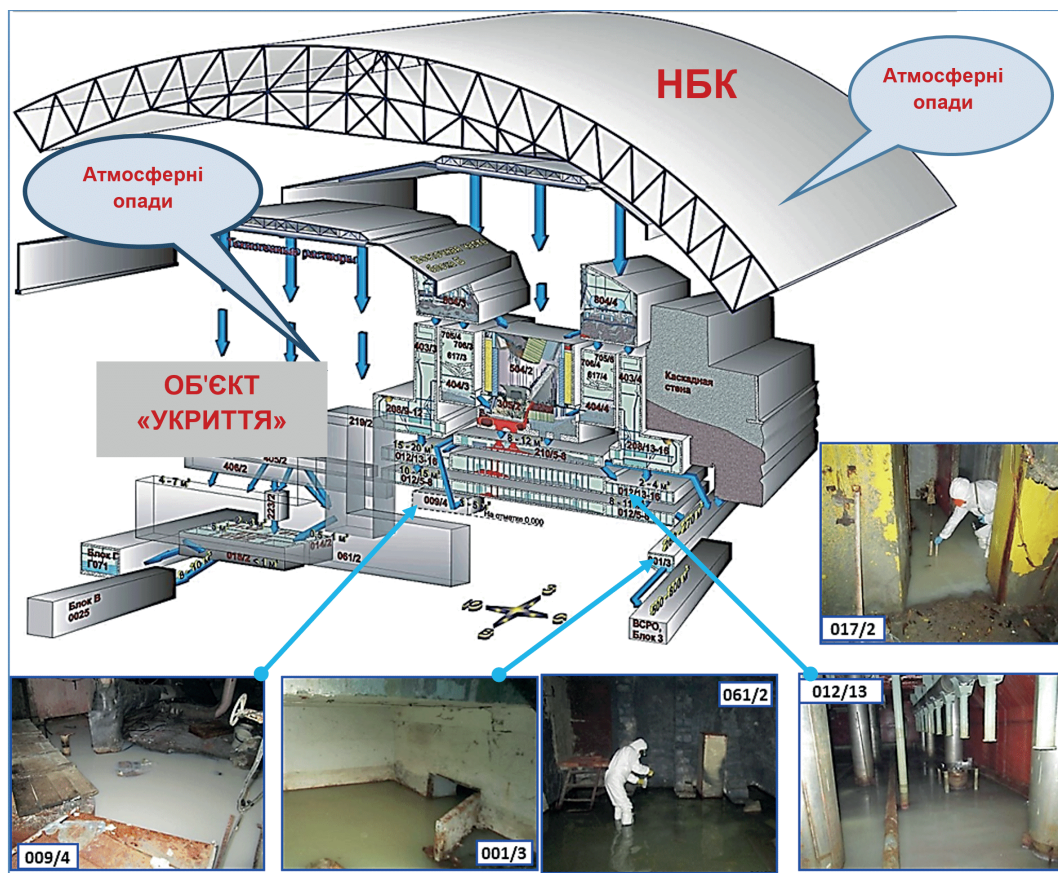


Рис. 3.53 — Схема розташування скупчень радіоактивної води в НБК

огляд, відбір проб, вимір глибин і оцінку площі водних скупчень РВ в приміщеннях на нижніх позначках об'єкта «Укриття». Внаслідок зміни умов випаровування (конденсації вологи та припинення надходження атмосферних опадів) об'єми неорганізованих скупчень РВ почали різко зменшуватись, а деякі з них зовсім висохли.

Радіоактивна вода до прим. 009/4 (рис. 3.54) надходить з розташованого вище прим. 207/4-5, а у весняно-літній період поповнюється за рахунок конденсату. Колір води (рис. 3.54, а) в прим. 009/4 вказує на прямі протікання пилопригнічувальних розчинів. 1998 року глибина води тут дорівнювала близько 25 см. Протягом 1999 року об'єм води істотно зменшився, і до середини 2000 року від скупчення води залишилися тільки невеликі калюжі. Проте після інтенсивних опадів у липні 2000-го рівень води відновився. Згодом об'єм води коливався від повного висихання до невеликої калюжі. У 2009 і 2010 роках кількість води в прим. 009/4 значно зростає, і в 2011—2013 роках рівень водного скупчення сягав 10—15 см. У разі подальшого підвищення рівня надлишок води перетікає через поріг до прим. 012/7. Глибина водного скупчення змінювалася 2016 року від 6 см у січні до 16 см в листопаді. Починаючи з січня 2017 року кількість РВ в прим. 009/4 почала зменшуватися і в лютому 2019 року повністю висохла (рис. 3.54, б).

Скупчення РВ в північній частині прим. 012/5-8 ББ формувалось протіканнями розташованих вище приміщень другого поверху басейну-барботера і паророзподільного коридору, а також конденсацією вологи в літній період. Колір води визначався наявністю пилопригнічувального розчину (рис. 3.55, а). Кількість РВ в цих приміщеннях останніми роками значно коливається. Вода витікає в напрямку прим. 001/3 через проходки в стіні.

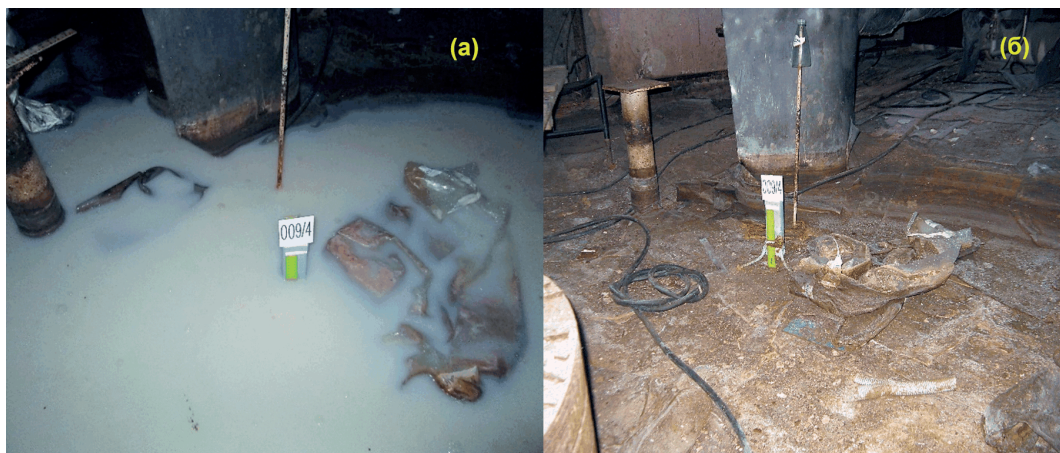


Рис. 3.54 — Пересихання скупчення радіоактивної води в прим. 009/4



Скупчення РВ у південній частині прим. 012/5-8 ББ формувалось так само, як у північній частині: протіканнями розташованих вище приміщень другого поверху ББ і прим. 208/11 ПРК, а також конденсацією вологи в літній період, але, крім того, сюди надходили організовані протікання зі свердловин у прим. 207/4-5. Колір води визначався наявністю пилопригнічувального розчину. Скупчення РВ в цих приміщеннях малопроточні. Об'єми скупчень визначаються процесами випаровування і конденсації. Починаючи з березня 2018 року вода в південній частині прим. 012/5-8 відсутня (рис. 3.55, б).



Рис. 3.55 — Скупчення радіоактивної води в прим. 012/16:  
а — вересень 2016 року; б — лютий 2020 року

Постійні скупчення РВ через надходження води з верхніх позначок мали прим. 013/2, 014/2 та південна частина коридору 017/2, 018/2. Рівень РВ в південній частині прим. 017/2 визначався висотою порога дверного отвору в прим. 018/2 — з підвищенням рівня надлишок води перетікав сюди. До 2017 року постійний об'єм РВ в прим. 017/2 становив приблизно 5,4 м<sup>3</sup>. Частина води з прим. 018/2 через систему трапних вод надходила до колекторного трубопроводу в прим. 001/3, а звідти — до прим. 001/3. Колір води в прим. 013/2, 014/2, 017/2 і 018/2 визначався прямими протіканнями пилопригнічувального розчину. Нині в прим. 013/2 (рис. 3.56, а), 014/2 і 018/2 води нема. Зазначимо, що внаслідок пересихання скупчень РВ оголюються донні відкладення, які згодом перетворюються на додаткові джерела радіоактивного пилу (рис. 3.56, б).





Рис. 3.56 — Донні відкладення після висихання скупчень радіоактивної води, 2020 рік:  
а — в прим. 013/2; б — в прим. 012/8

Скупчення РВ у північній частині прим. 012/13-16 ББ (рис. 3.57) формувалось протіканнями з розташованих вище приміщень ПРК, а також конденсацією вологи в літній період. Крім того, сюди надходять протікання з центральної частини ББ. У період, коли випаровування стають переважним процесом, водні скупчення скорочуються до розмірів калюж. Витікання води формується в напрямку приміщень першого поверху ББ.



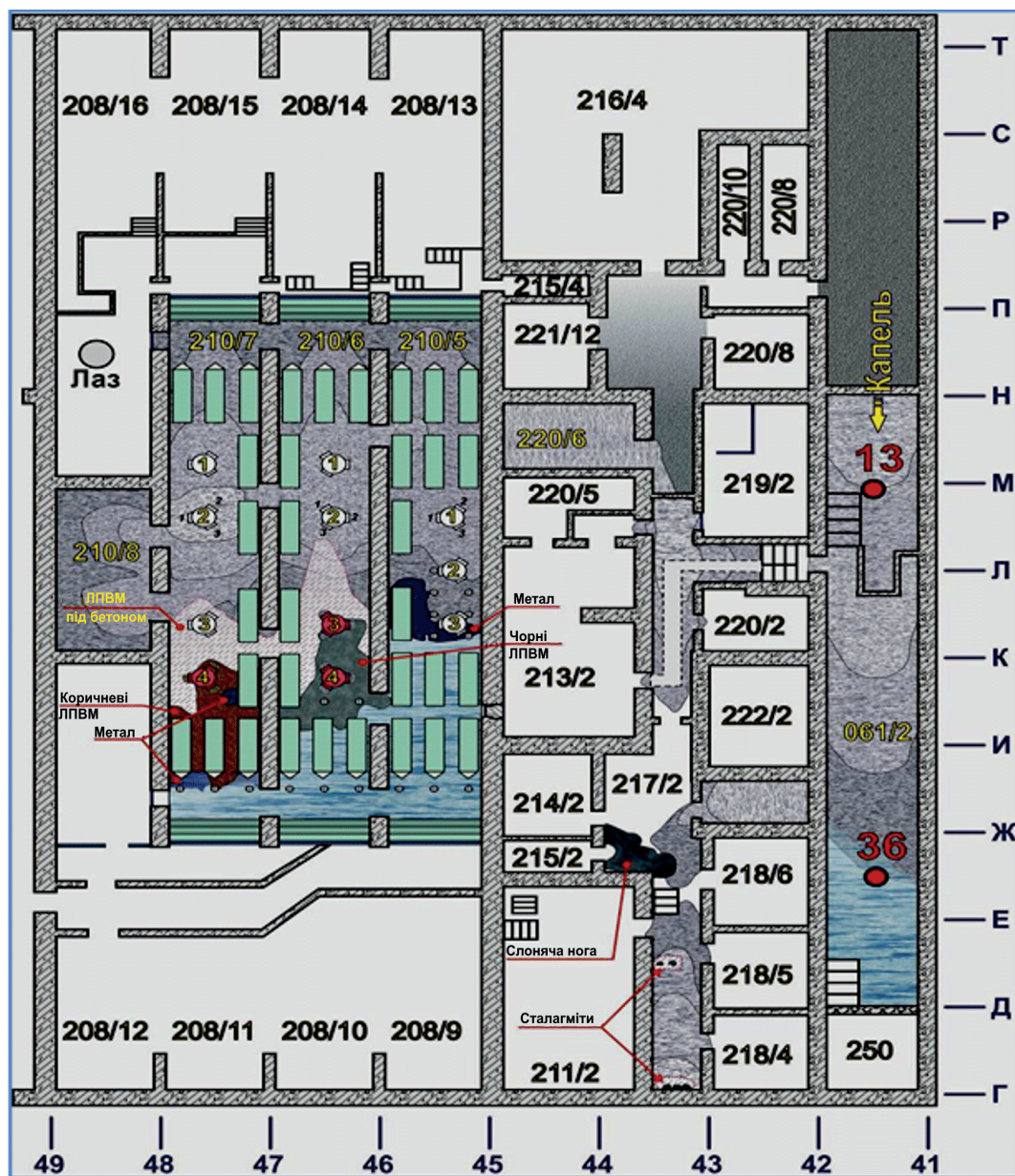


Рис. 3.58 — План розташування скупчень радіоактивної води і точок пробовідбору в приміщеннях об'єкта «Укриття» на позначці 6.000



Скупчення РВ об'ємом коло  $5 \text{ м}^3$  (рис. 3.58) в південній частині прим. 061/2 формувалось протіканням РВ (зокрема, пилопригнічувального розчину) з верхніх позначок через шахту розвантажувально-завантажувальної машини до північної частини приміщення і далі схилом бетонного напливу в південному напрямку. У холодний період року скупчення повністю замерзає. Танення льоду закінчується до травня. Внаслідок сезонної кристалізації радіоактивна вода в скупченні залишається безбарвною і прозорою до моменту надходження протікань пилопригнічувального розчину. Висота шару води біля південної стіни приміщення сягала 40 см, проте з вересня по жовтень 2016 року рівень РВ у прим. 061/2 становив близько 20 см. Протягом 2017—2018 років це скупчення РВ висохло повністю.

Скупчення РВ є також у південній частині прим. 210/5-7 ПРК. Сумарний об'єм РВ може сягати  $10 \text{ м}^3$ . Контроль скупчень у цих приміщеннях ускладнюється високим рівнем  $\gamma$ -випромінювання від ЛПВМ. Існує ймовірність витікання до розташованих нижче приміщень ББ.

Об'єми скупчень РВ у контрольованих приміщеннях і динаміка перетікань води протягом року характеризуються сезонною циклічністю (рис. 3.59). На діаграмі добре простежуються періоди випаровування води із скупчень РВ і періоди надходження конденсаційної вологи.

На скупчення радіоактивної води в прим. 001/3 звернемо особливу увагу, оскільки це найбільше скупчення РВ (об'ємом приблизно  $265 \text{ м}^3$ ) і донних відкладень

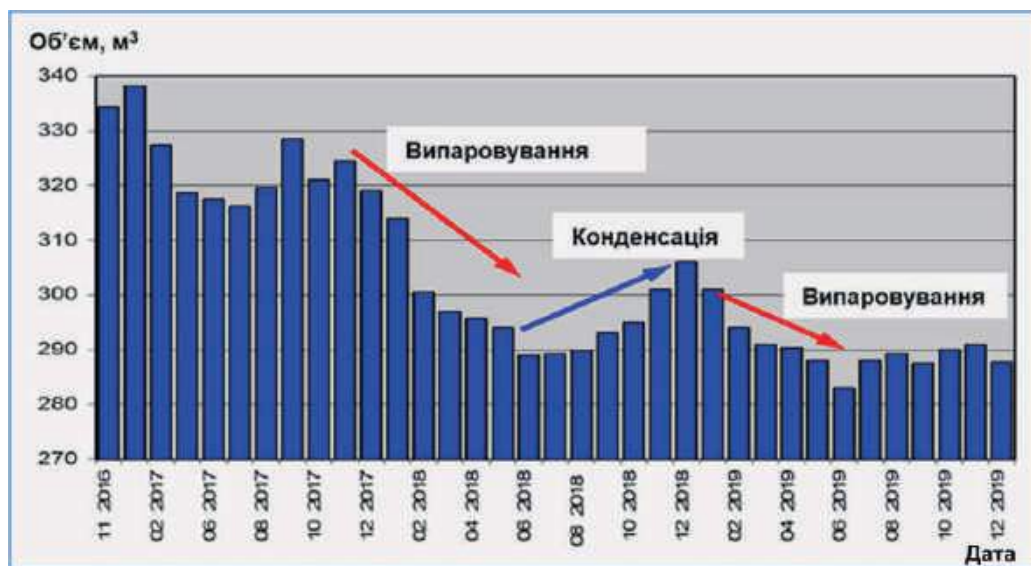


Рис. 3.59 — Динаміка сезонних змін об'ємів радіоактивної води в НБК, 2016—2019 роки



(до 65 м³). Дані про надходження РВ у прим. 001/3 з візуально контрольованих джерел — зі свердловин і труби з ПРК — наведено в табл. 3.11. Надходження у 2020 році води з боку каскадної стіни із свердловини не спостерігалось (рис. 3.60 та 3.61). Це пов'язано зі зниженням рівня ґрунтових вод в локальній зоні об'єкта «Укриття» в результаті осушення водойми-охолоджувача Чорнобильської АЕС. Надходження РВ з труби з ПРК дуже мале — 0,001...0,0015 м³ щомісяця. Найімовірніше, це протікання технологічної води з комунікацій водопостачання четвертого енергоблока.

Результати обстежень скупчень РВ у різних приміщеннях об'єкта «Укриття» наведено в табл. 3.12 станом на 2020 рік, динаміку зміни глибини скупчень РВ у 2016—2020 роках показано на рис. 3.62.

**Таблиця 3.11 — Надходження радіоактивної води в прим. 001/3 з візуально контрольованих джерел, січень — березень 2020 року**

Місяць	Приток РВ, м³/міс			Метеодані	
	точка 8	точка 20	всього	Опади, мм	t, °C
Січень	0,0	0,0011	0,0011	27,4	0,6
Лютий	0,0	0,0015	0,0015	26,1	1,9
Березень	0,0	0,0008	0,0008	19,8	5,0
Всього	0	0,0034	0,0034	73,3	

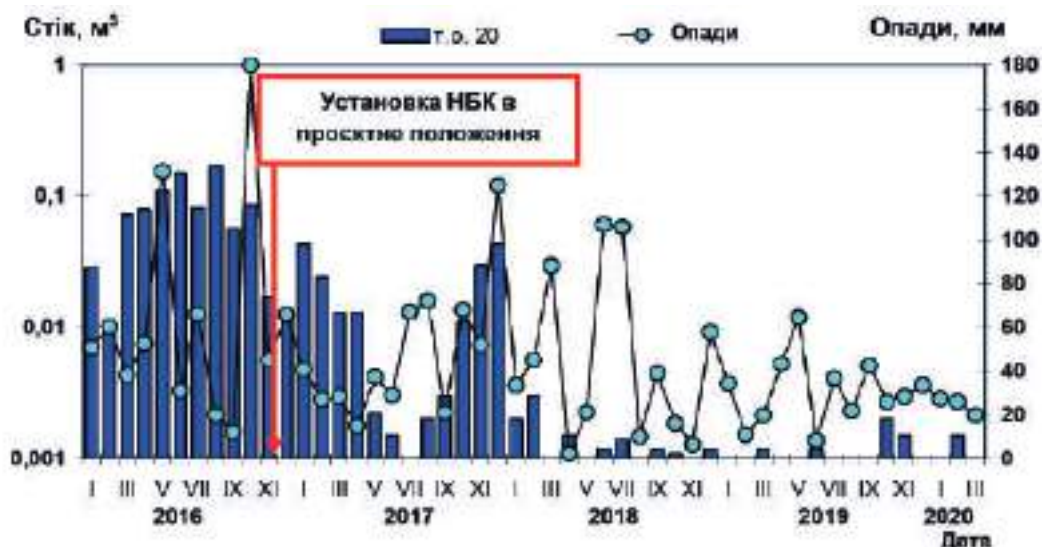


Рис. 3.60 — Середньомісячне надходження радіоактивної води з труби з ПРК



Рис. 3.61 — Пересихання радіоактивної води в тарі для її збору з труби з ПРК в прим. 001/3 об'єкта «Укриття»

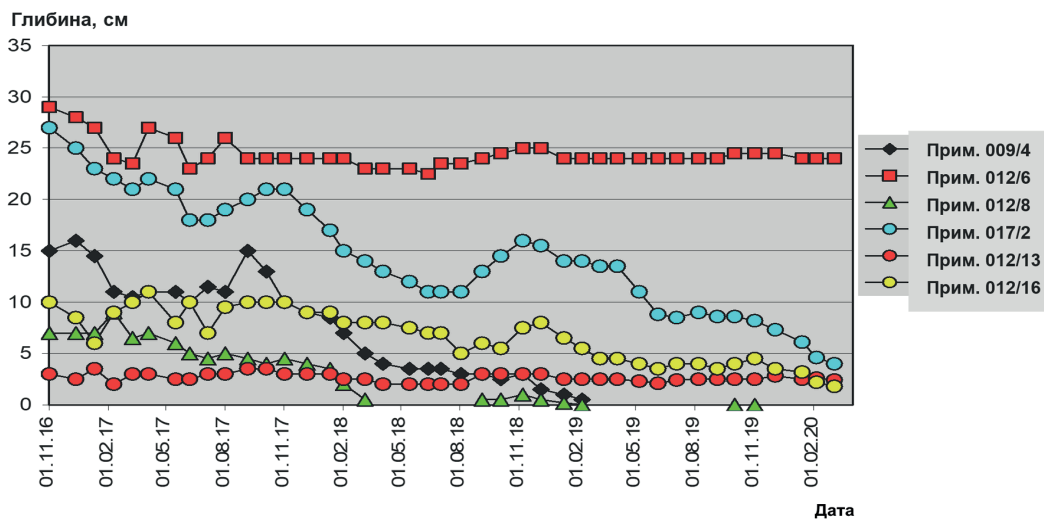


Рис. 3.62 — Динаміка зміни глибини скупчень радіоактивної води в приміщеннях об'єкта «Укриття», 2016—2020 роки

**Таблиця 3.12 — Об'єми основних скупчень радіоактивної води  
в об'єкті «Укриття», 2020 рік**

Номер приміщення	Позначка, м	Вісь	Ряд	Глибина, см	Площа, м <sup>2</sup>	Об'єм РВ, м <sup>3</sup>
012/6, 7, 8	-0,95	46 – 49	С – Т	24	9 х 3	6,4
012/6	-0,65	46 – 47	П – Т	0,1	10	0,01
012/7	-0,65	47 – 48	П – Т	0,5	10	0,05
012/8	-0,65	48 – 49	П – Т	0,2	10	0,02
012/13	+2,20	45 – 46	П – Т	2,6	40	1,1
012/13	+2,20	45 – 46	Г – Ж	1,0	20	0,2
012/14	+2,20	46 – 47	Г – Ж	1,5	20	0,3
012/15	+2,20	47 – 48	Г – Ж	2,0	15	0,3
012/16	+2,20	48 – 49	Г – Ж	2,2	30	0,66
017/2	+0,00	43 – 44	Г – Е	4,6	5,0	0,23
001/3	-2,60	41 – 51	У – У1	110	250	273

**Таблиця 3.13 — Концентрації урану, г/м<sup>3</sup>, і радіонуклідів, Бк/м<sup>3</sup>,  
у радіоактивній воді, 2020 рік**

Номер приміщення (точка відбору)	Уран	<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs	<sup>154</sup> Eu
012/16 (6)	140 ± 20	(3,8 ± 0,5) · 10 <sup>9</sup>	(1,4 ± 0,2) · 10 <sup>11</sup>	(1,1 ± 0,2) · 10 <sup>7</sup>
017/2 (18)	11 ± 2	(3,8 ± 0,7) · 10 <sup>7</sup>	(6,7 ± 0,8) · 10 <sup>9</sup>	(1,9 ± 0,3) · 10 <sup>5</sup>
01/3 (20)	29 ± 4	(3,4 ± 0,6) · 10 <sup>9</sup>	(1,3 ± 0,2) · 10 <sup>11</sup>	(1,3 ± 0,2) · 10 <sup>6</sup>
012/13 (21)	2,6 ± 0,4	(1,3 ± 0,2) · 10 <sup>7</sup>	(4,8 ± 0,6) · 10 <sup>9</sup>	(1,9 ± 0,7) · 10 <sup>5</sup>
001/3 (30)	7,4 ± 1,1	(1,3 ± 0,2) · 10 <sup>9</sup>	(8,1 ± 1,2) · 10 <sup>9</sup>	(7,5 ± 1,9) · 10 <sup>5</sup>
012/6 (31)	32 ± 4	(2,5 ± 0,5) · 10 <sup>9</sup>	(2,7 ± 0,3) · 10 <sup>10</sup>	(1,2 ± 0,3) · 10 <sup>6</sup>
Номер приміщення (точка відбору)	<sup>238</sup> Pu	<sup>239+240</sup> Pu	<sup>241</sup> Am	<sup>244</sup> Cm
012/16 (6)	(7,2 ± 0,8) · 10 <sup>6</sup>	(1,5 ± 0,2) · 10 <sup>7</sup>	(9,2 ± 1,1) · 10 <sup>7</sup>	(2,8 ± 0,4) · 10 <sup>6</sup>
017/2 (18)	(1,6 ± 0,2) · 10 <sup>5</sup>	(4,2 ± 0,6) · 10 <sup>5</sup>	(1,8 ± 0,3) · 10 <sup>6</sup>	(3,9 ± 0,7) · 10 <sup>4</sup>
01/3 (20)	(2,7 ± 0,4) · 10 <sup>6</sup>	(5,9 ± 0,8) · 10 <sup>6</sup>	(1,4 ± 0,2) · 10 <sup>7</sup>	(4,2 ± 0,8) · 10 <sup>5</sup>
012/13 (21)	(9,4 ± 1,7) · 10 <sup>4</sup>	(1,9 ± 0,2) · 10 <sup>5</sup>	(1,8 ± 0,3) · 10 <sup>6</sup>	(4,5 ± 0,8) · 10 <sup>4</sup>
001/3 (30)	(2,5 ± 0,3) · 10 <sup>5</sup>	(4,9 ± 0,7) · 10 <sup>5</sup>	(6,3 ± 0,9) · 10 <sup>6</sup>	(1,9 ± 0,4) · 10 <sup>5</sup>
012/6 (31)	(3,2 ± 0,5) · 10 <sup>5</sup>	(7,5 ± 1,1) · 10 <sup>5</sup>	(8,2 ± 1,3) · 10 <sup>6</sup>	(2,7 ± 0,6) · 10 <sup>5</sup>

---

Станом на 2020 рік у прим. 012/5, 012/6, 012/7, 012/8, 012/14, 012/15, 012/16, 009/4, 013/2, 014/2, 018/2, 210/7 радіоактивної води нема. Зазначимо, що в період випаровування води (січень — березень) надходження РВ у прим. 012/13, 012/6-8 і 001/3 можливе тільки з пошкоджених трубопроводів водопостачання об'єкта «Укриття», і це проблема, яку треба вирішити найближчим часом. Радіонуклідний склад основних скупчень РВ залишився тим самим, що й до встановлення НБК, і характеризується радіонуклідами чорнобильського генезису (продуктами поділу  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  і трансурановими елементами  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  та  $^{244}\text{Cm}$ ).

Дані  $\gamma$ -спектрометричних вимірювань і радіохімічного аналізу проб РВ, відібраних на нижніх позначках об'єкта «Укриття» 2020 року, наведені в табл. 3.13. Концентрація урану змінюється від 2,6 до 140 г/м<sup>3</sup>. Максимальна питома активність  $^{137}\text{Cs}$  в РВ південної частини прим. 012/16 становить  $1,4 \cdot 10^{11}$  Бк/м<sup>3</sup>. Питома активність трансуранових елементів  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  і  $^{244}\text{Cm}$  так само найбільша в прим. 012/16 і сягає по  $^{239+240}\text{Pu}$   $1,5 \cdot 10^7$  Бк/м<sup>3</sup>,  $^{241}\text{Am}$  —  $9,2 \cdot 10^7$  Бк/м<sup>3</sup>. Найменший розкид середньорічних значень концентрації урану та об'ємної активності радіонуклідів маємо в малопроточних скупченнях РВ, що локалізовані в прим. 009/4, північній частині прим. 012/5-8 і в прим. 012/13-16. Протягом року найбільші зміни концентрації урану та об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  і трансуранових елементів відбуваються в протіканнях, що надходять з труби з ПРК, колектора на позначці 9.000 м, у прим. 017/2, через яке проходить основний водотік у південно-східній частині блока Б. Концентрація урану в радіоактивній воді НБК після насування арки НБК лежала в межах від 0,6 до 60 г/м<sup>3</sup> (за винятком липня 2017 року — 80 г/м<sup>3</sup>).

Об'ємна активність  $^{90}\text{Sr}$  в радіоактивній воді залежно від місця відбору проб коливається від  $1,3 \cdot 10^7$  до  $3,18 \cdot 10^{10}$  Бк/м<sup>3</sup>. Об'ємна активність  $^{137}\text{Cs}$  в постійних скупченнях і протіканнях РВ становила 2020 року приблизно  $1 \cdot 10^{11}$  Бк/м<sup>3</sup>. Найбільшу об'ємну активність  $^{137}\text{Cs}$  в радіоактивній воді об'єкта «Укриття» зафіксовано 2002 року в південній частині прим. 012/7 —  $1,2 \cdot 10^{12}$  Бк/м<sup>3</sup>.

Об'ємна активність ізотопів  $^{154}\text{Eu}$  і  $^{155}\text{Eu}$  в РВ становить від  $8,7 \cdot 10^3$  до  $1,1 \cdot 10^6$  Бк/м<sup>3</sup>. Максимальна активність трансуранових елементів ( $^{238}\text{Pu}$  +  $^{239+240}\text{Pu}$  +  $^{241}\text{Am}$  +  $^{244}\text{Cm}$  +  $^{242}\text{Cm}$ ) може досягати  $1 \cdot 10^8$  Бк/м<sup>3</sup>. Зауважимо на наявність у радіоактивній воді радіонукліда  $^{242}\text{Cm}$ , що зумовлено розпадом материнського радіонукліда  $^{242}\text{Am}$ . Як і раніше, найбільший внесок до сумарної  $\alpha$ -активності належить  $^{241}\text{Am}$  — до 80 %.

Концентрації радіонуклідів  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ , урану зростають (урану майже втричі) в приміщеннях першого і другого поверхів басейну-барботера НБК внаслідок випаровування води з цих скупчень (рис. 3.63). Стабілізація середніх концентрацій  $^{90}\text{Sr}$  в радіоактивній воді на цей час може бути зумовленою такими причинами: співосадженням надлишку стронцію та  $\text{CaCO}_3$  з підвищенням концентрації карбонат-іонів у період, коли процес випаровування вологи превалює над процесом конденсації; розчиненням осаджених форм стронцію із зменшенням концентрації карбонат-іонів, наприклад у разі інтенсивного надходження води.



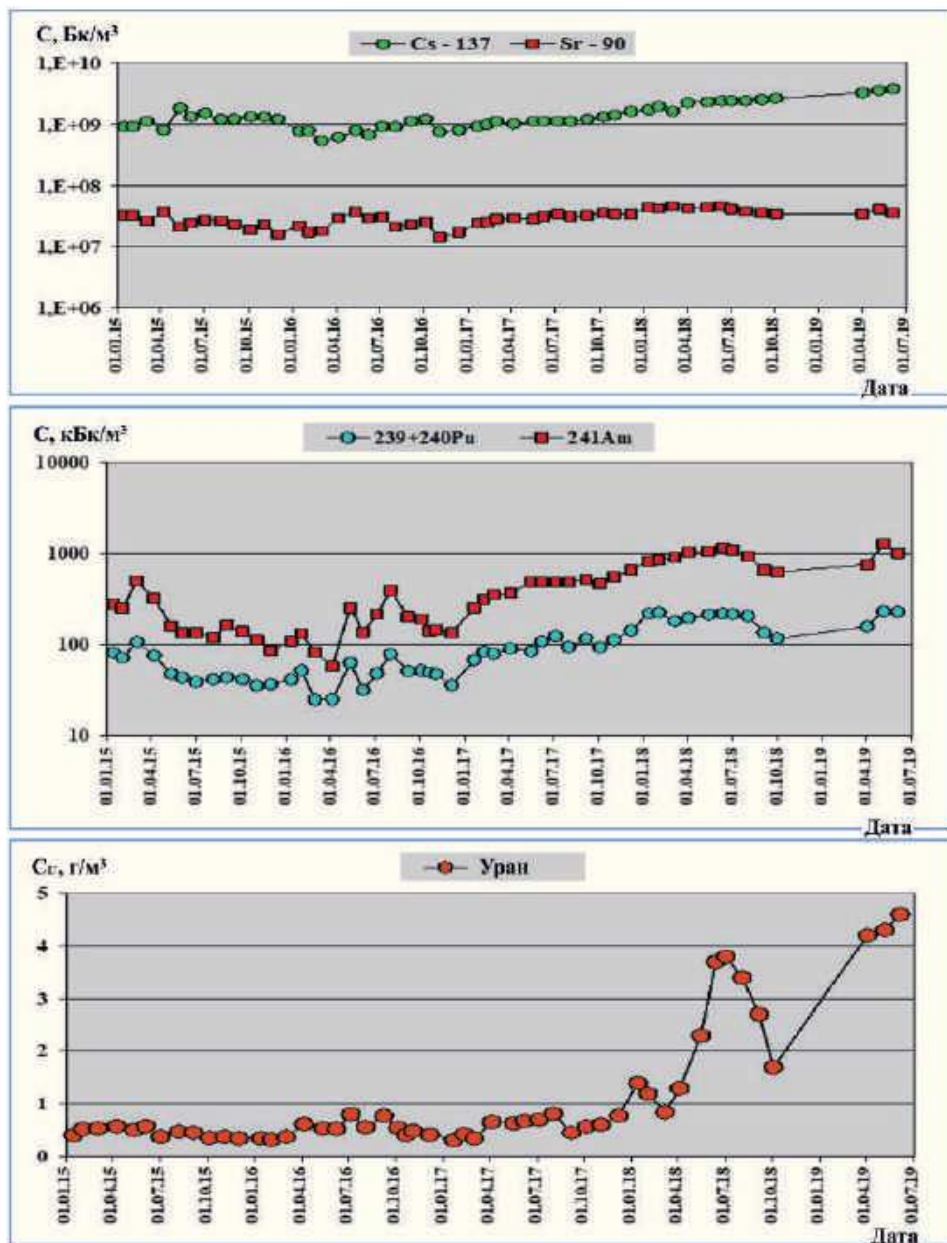


Рис. 3.63 — Динаміка зростання концентрацій радіонуклідів  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ , урану в прим. 017/2 об'єкта «Укриття» (точка відбору 18), 2015—2019 роки

Хімічний склад РВ об'єкта «Укриття» визначається переважно процесами вилуговування макрокомпонентів (натрію, калію, кальцію, магнію, карбонатів, хлоридів, сульфатів тощо) з бетонних будівельних конструкцій та органічних компонентів промивних розчинів і розчинів для МСПП [118, 119]. Тому, як і до встановлення НБК, макрокомпонентний склад РВ практично не змінився. На сьогодні винятком є тільки зменшення концентрацій органічних сполук, що входять до складу пилопригнічувальних розчинів, через різке зменшення кількості сеансів пилопригнічування.

Величина рН у скупченнях РВ змінюється від 9,2 до 9,7, що свідчить про їх лужне середовище. Концентрація фосфатів ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) коливається від 0,11 до 4,9 мг/дм<sup>3</sup>. Вміст карбонатів і гідрокарбонатів становить 160—910 і 460—2140 мг/дм<sup>3</sup> відповідно. Концентрація гідрокарбонатів значно збільшилася в радіоактивній воді прим. 01/3, 017/2, 012/13, 014/2, 012/16 і перевищує 1000 мг/дм<sup>3</sup>. Збільшення концентрації макрокомпонентів закономірне і зумовлене зменшенням об'ємів РВ через випаровування і, відповідно, концентруванням катіонів та аніонів.

Динаміку зміни величини рН і концентрації карбонатів та гідрокарбонатів у радіоактивній воді в прим. 017/2 після побудови НБК наведено на рис. 3.64.

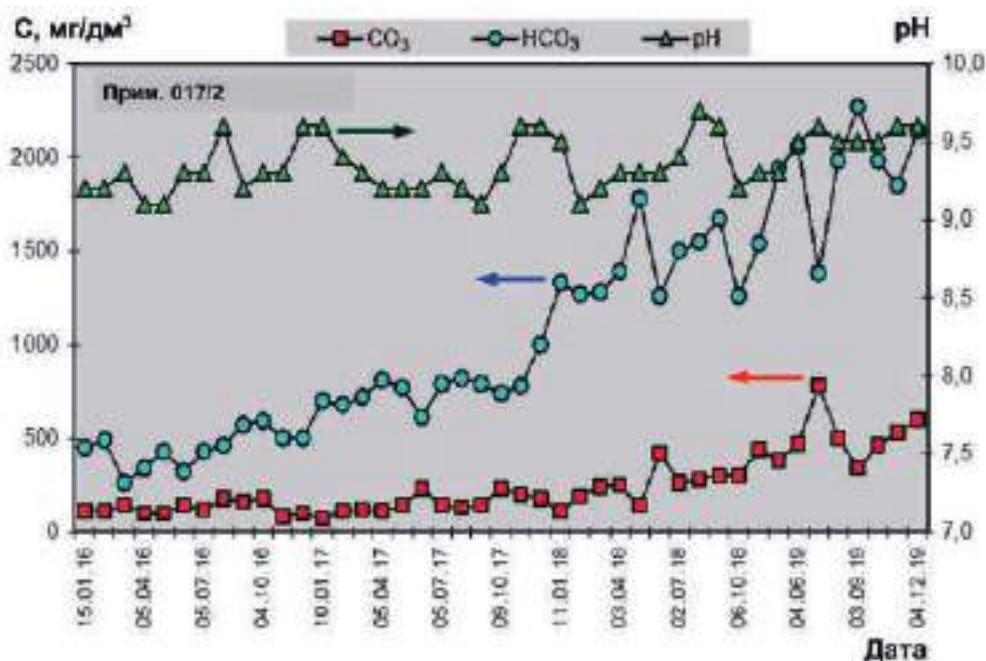


Рис. 3.64 — Динаміка концентрацій карбонатів і гідрокарбонатів та значення рН у радіоактивній воді прим. 017/2 НБК

Донні відкладення у водних скупченнях утворюються в результаті коагуляції та осадження колоїдів і зважених (у вигляді суспензії) частинок твердої фази. Тому методика дослідження містила в своєму складі відбір як донних відкладень, так і проб блочної води із зваженими частинками твердої фази, без вимучування шару донних відкладень. Загальний об'єм відкладень орієнтовно становить 70 м<sup>3</sup>, причому більша частина їх, приблизно 65 м<sup>3</sup>, зосереджена в прим. 001/3. Оцінку кількості донних відкладень у приміщеннях об'єкта «Укриття» наведено в табл. 3.14.

**Таблиця 3.14 — Середні об'єми донних відкладень  
в основних водних скупченнях об'єкта «Укриття»**

Позначка	Номер приміщення	Координати, вісь/ряд	Об'єм донних відкладень, м <sup>3</sup>
-2.600	001/3	У÷У1 / 42÷51	65
-0.650	009/4	И÷Е / 49÷50	0,1
-0.650	013/2	Г÷Е / 44÷45	2,0
-0.650	014/2	И÷Ж / 44÷45	1,0
-0.650	017/2	Г÷Д / 43÷44	0,1
-0.650	018/2	Г÷И / 42÷43	0,1
-0.650	012/5-8	Г÷Т / 45÷49	1,0
+2.200	012/13-16	Г÷Т / 45÷49	0,5
+6.000	219/2	М÷Н / 42÷43	0,3
+6.000	223/2	И÷Ж / 42÷43	0,3

Донні відкладення є неоднорідною сумішшю грубодисперсних частинок і чорного мулу з характерним запахом органічних речовин, що розкладаються. Нижній шар донних відкладень складається переважно із звичайного піску (SiO<sub>2</sub>), який, імовірно, утворився руйнуванням пластифікованого бетону. Верхній шар складається з легшої і радіоактивнішої мулистій фракції. Його склад — сполуки кальцію і кремнію, найімовірніше у вигляді CaCO<sub>3</sub>, CaSiO<sub>3</sub> (більше ніж 60 % в перерахунку на сухий залишок), заліза, магнію, урану, а також деяка кількість органічних сполук. Середня густина сухого осаду — 1,54 г/см<sup>3</sup>. Вологість мулистій фракції осаду — орієнтовно 85 %.

За інформацією, що є на цей час, склад донних відкладень, як правило, формується в результаті деструкції пластифікованого і конструкційного бетону, корозії металевих конструкцій, коагуляції та осадження колоїдних форм і розчинних продуктів деструкції та корозії, осадження органічних сполук. Отже, за час, що пройшов після аварії, на нижніх позначках четвертого енергоблока накопичилася велика кількість високоактивних (до 1010 Бк/кг) донних відкладень. Очевидно, що висихання їх

приведе до значного підвищення рівнів забруднення повітря, причому найбільшу небезпеку при інгаляційному надходженні являють ізотопи  $^{241}\text{Am}$  та  $^{238, 239, 240}\text{Pu}$ .

Донні відкладення в прим. 001/3 (рис. 3.65) з'явилися внаслідок осадження дисперсної фази, утворення малорозчинних солей карбонатів кальцію і магнію, коагуляції та осадження малорозчинних гідроксидів важких металів до 33 см завтовшки. Проби донних відкладень відбирали в 2016—2017 роках за допомогою металевої желонки через свердловину (т. в. 30), пробурену в підлозі прим. 001/3.

Вологість проби донних відкладень становить 54 %; втрати в процесі прожарювання — 19 % (визначаються переважно кількістю органічної фази в донних відкладеннях). Густина мулу — від 1,2 до 1,4 г/см<sup>3</sup>.

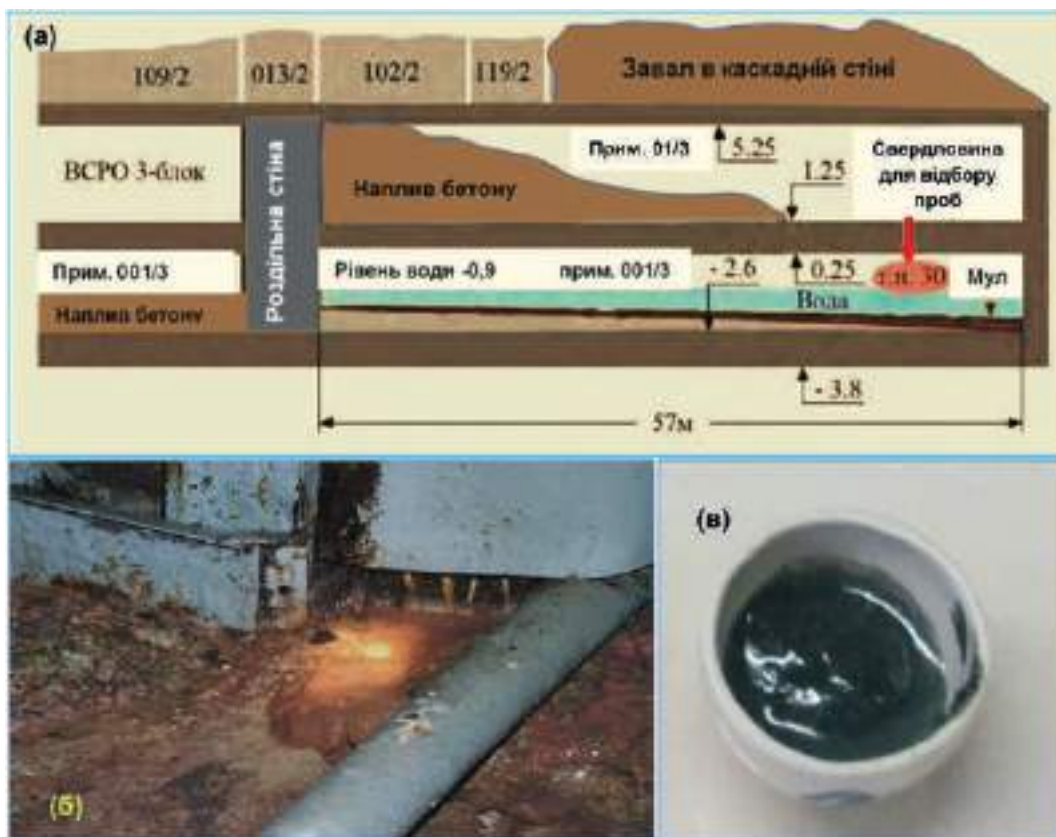


Рис. 3.65 — Приміщення 001/3:

а — схема приміщень на позначці -2,60 м з найбільшим в об'єкті «Укриття» скупченням РВ;  
б — донні відкладення; в — вигляд проби мулу



Питома активність радіонуклідів у пробі донних відкладень прим. 001/3 2016 року за сумою  $\alpha$ -,  $\beta$ -випромінюючих нуклідів становила  $3 \cdot 10^9$  Бк/кг (у перерахунку на повітряно-сухий стан) і в межах порядку величини відповідала значенням, отриманим у 2006—2015 роках. Це підтверджує висновок про стабільність вмісту радіонуклідів у прим. 001/3 впродовж останніх десяти років (табл. 3.15).

**Таблиця 3.15 — Питома активність донних відкладень прим. 001/3 об'єкта «Укриття», Бк/кг**

Дата відбору	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{154}\text{Eu}$	$^{238}\text{Pu}$	$^{239+240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$	$^{244}\text{Cm}$
02.07.2015	$5,7 \cdot 10^8$	$8,5 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^6$	$3,3 \cdot 10^5$	$7,1 \cdot 10^5$	$7,5 \cdot 10^6$	$2,7 \cdot 10^5$
07.06.2016	$6,9 \cdot 10^8$	$9,1 \cdot 10^8$	$7,1 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^5$	$6,5 \cdot 10^5$	$5,1 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^5$
05.07.2017	$7,4 \cdot 10^8$	$8,1 \cdot 10^8$	$9,8 \cdot 10^5$	$5,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^6$	$7,3 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^5$

Вміст та ізотопний склад урану в донних відкладеннях прим. 001/3 наведено в табл. 3.16. Концентрація урану в досліджених пробах донних відкладень — від 2 до 3 г/кг, що в межах похибок вимірювань відповідає значенням 2006 і 2015 років. Вміст  $^{235}\text{U}$  становить від 0,026 до 0,033 г/кг. Ізотопний склад урану в донних відкладеннях в цілому відповідає ізотопному складу опроміненого палива четвертого енергоблока Чорнобильської АЕС з середнім вигоранням.

**Таблиця 3.16 — Вміст урану в донних відкладеннях прим. 001/3 об'єкта «Укриття», 2015—2017 роки**

Дата відбору	Уран, г/кг	Ізотопний склад урану, %			
		$^{234}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{236}\text{U}$	$^{238}\text{U}$
02.07.2015	$3,1 \pm 0,5$	0,016	1,06	0,19	98,7
07.06.2016	$2,4 \pm 0,4$	0,015	1,03	0,19	98,8
05.07.2017	$2,2 \pm 0,4$	0,015	0,98	0,17	98,85

Для прогнозу радіаційного стану донних відкладень і подальшого поведіння з ними треба знати, якою є хімічна форма радіонуклідів і урану в них. Збагачення донних відкладень  $^{137}\text{Cs}$ , ймовірно, пов'язано з тим, що іонні форми цезію сорбувались на дрібнодисперсних частинках природних неорганічних іонообмінників, які утворилися через деструкцію конструкційних матеріалів і компонентів засипки (пісок, глина), скинутих з гелікоптерів до «розвалу» зруйнованого четвертого енергоблока під час активної фази ліквідації наслідків аварії.

---

Радіоактивна вода, що надходить до прим. 001/3 з верхніх позначок об'єкта «Укриття», є слабомінералізованою і достатньо добре розчиняє  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$ . Під час руху води з верхніх позначок до нижніх вона взаємодіє з бетоном, тому концентрація карбонатів у РВ більшає, а розчинність лужноземельних елементів (Mg, Ca і Sr) меншає. Коли концентрації карбонат-іонів високі, що характерно для РВ на нижніх позначках, стронцій утворює важкорозчинний карбонат стронцію —  $\text{SrCO}_3$ , який співосаджується з  $\text{CaCO}_3$ .

Експериментально встановлено, що середня концентрація кальцію в РВ на нижніх позначках об'єкта «Укриття» становить приблизно 30 мг/л. Це значення фактично є межею розчинності кальцію в лужно-карбонатних розчинах, тому надлишок карбонату кальцію випадає в осад. Дослідження хімічного складу донних відкладень підтвердило, що найзбагатеніші  $^{90}\text{Sr}$  дрібнодисперсні частинки твердої фази (від 0,01 до 0,03 мкм) здебільшого складаються з  $\text{CaCO}_3$ . Трансуранові елементи в процесі руйнування паливовмісних матеріалів під впливом вологи утворюють в умовах об'єкта «Укриття» (лужно-карбонатне середовище) нерозчинні сполуки, велика частина яких залишається в зоні локалізації ПВМ.

До нижніх позначок об'єкта «Укриття» транспортується близько 25 %  $^{241}\text{Am}$  і менш як 5 % ізотопів плутонію, причому виключно в колоїдних формах. Розподіл форм знаходження радіонуклідів  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  та  $^{244}\text{Cm}$  в донних відкладеннях прим. 001/3 наведено на рис. 3.66. Найбільша частина водорозчинних і обмінних форм належить  $^{137}\text{Cs}$  — 3,5 і 45,0 % відповідно. Більше ніж 65 %  $^{90}\text{Sr}$  міститься в карбонатних сполуках, його обмінні форми становлять 17 %. Рухомі форми  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$ , до яких зазвичай відносять суму водорозчинних, обмінних, карбонатних і кислоторозчинних форм (у 1 моль/л  $\text{HCl}$ ), становлять 97 і 89 % відповідно.

Трансуранові елементи  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  і  $^{244}\text{Cm}$  згідно зі своїми хімічними властивостями переважно містяться у гідроксидних сполуках і переходять у розчинний стан, якщо  $\text{pH} \geq 4,8$ . Частка обмінних форм плутонію, америцію і кюрію не перевищує 4 %. Більше половини  $^{238}\text{Pu}$  і  $^{239+240}\text{Pu}$  мають кислоторозчинні форми.

За даними про стан і поведінку РВ можна дійти висновку, що встановлення НБК в проектне положення повністю унеможливило попадання атмосферної вологи в приміщення об'єкта «Укриття», а оптимізація роботи системи пилопригнічення звела до мінімуму надходження техногенних розчинів. Результати останніх досліджень показали, що в приміщеннях першого поверху ББ 012/5-8 радіоактивної води нема, за винятком приямків у прим. 012/6-7. У прим. 017/2 південно-східної частини блока Б залишилось менше 0,5 м<sup>3</sup> радіоактивної води. В приміщеннях другого поверху ББ 012/13-16 скупчень РВ нема, за винятком прим. 012/13. В північній частині прим. 012/13 постійно спостерігається від 1,2 до 1,8 м<sup>3</sup> РВ незалежно від пори року.

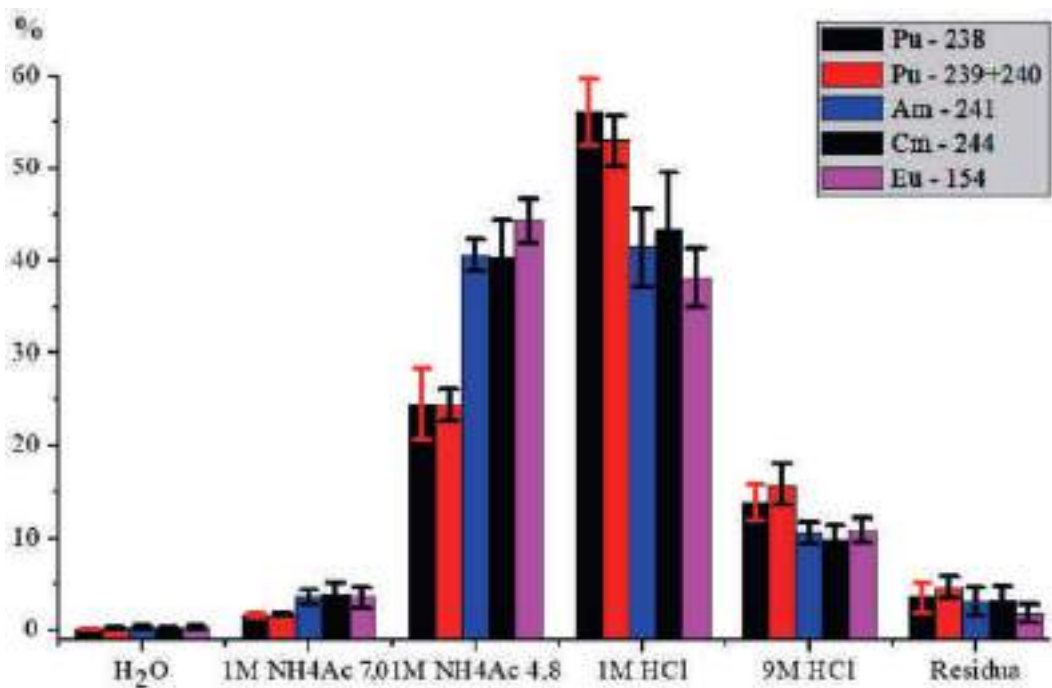


Рис. 3.66 — Розподіл форм радіонуклідів у донних відкладеннях прим. 001/3

Випаровування води постійно компенсується її надходженням. Джерело надходження води до північної частини прим. 012/13 на сьогодні не встановлено. Можливо, вода потрапляє з пошкоджених технологічних магістралей живлення водою об'єкта «Укриття», і цьому факту треба приділити увагу.

Скупчення РВ, об'єми якого практично не змінилися, — це скупчення в прим. 001/3, найбільше в об'єкті «Укриття», оскільки тут акумулюється не тільки велика частина протікань північної частини блока Б, але й протікання з південного водотоку. В прим. 001/3 також зосереджена основна частина донних відкладень об'єкта «Укриття». Верхній шар відкладень представлений текучими мулами чорного кольору з характерним запахом органічних речовин, що розкладаються. Товщина шару в точці відбору проб становить приблизно 0,2 м. Нижче залягає шар ущільнених донних відкладень з великим вмістом піску. Об'єм донних відкладів оцінюється в 65 м<sup>3</sup>. Водний потік з контрольованого приміщення просочується через розділову стіну до прим. 001/3 третього енергоблока і потребує періодичного видалення.

---

---

У процесі висихання скупчень РВ утворюються донні відкладення з підвищеним відносним вмістом  $^{244}\text{Сm}$ , який є основним джерелом нейтронів спонтанного поділу.

Об'єми радіоактивної води у приміщеннях об'єкта «Укриття» скорочуються внаслідок випаровування води, при цьому концентрація урану та об'ємна активність радіонуклідів у радіоактивній воді збільшуються в кілька раз. Інтенсивне пересихання скупчень радіоактивної води і оголення високоактивних дрібнодисперсних донних відкладень може призвести до появи нових джерел радіоактивних аерозолів. Щоб запобігти їх негативному впливу на радіаційну безпеку НБК, першочерговими мають стати дослідження донних відкладень та розробка превентивних заходів щодо їх локалізації.

До встановлення НБК радіоактивна вода була своєрідним маркером, оскільки несла інформацію про стан ПВМ, а моніторинг радіоактивної води — одним з методів їх неоперативного контролю. Наразі цей вид контролю треба замінити ефективнішим, наприклад відеоконтролем скупчень ПВМ та дослідженням донних відкладень.



---

## **Розділ 4. ВПЛИВ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТА НА ДОВКІЛЛЯ**

Вплив об'єкта «Укриття» на довкілля контролюється впродовж всього періоду його існування [120—123]. Спочатку моніторинг радіоактивного забруднення вівся спорадично, і тільки пізніше, 1987 року, сформувалася цілісна система регламентного моніторингу стану приземного шару атмосфери на території, що безпосередньо примикає до об'єкта «Укриття» (далі— локальна зона об'єкта «Укриття»), та на прилеглих до неї ділянках. Важливість спостережень за станом забруднення повітря зумовлена наявністю природних чинників надходження радіоактивних аерозолів, як-от: вітрове перенесення радіоактивного пилу з відкритих ділянок прилеглих територій; лісові пожежі на території ближньої зони Чорнобильської АЕС [124]; земляні роботи на майданчику станції; рух автомобільного транспорту; будівельні роботи в локальній зоні об'єкта «Укриття». Донедавна важливим джерелом надходження радіоактивних аерозолів (РА) був і сам об'єкт «Укриття». На цей час система моніторингу радіоактивного забруднення приземного шару повітря є ключовою системою, що здійснює контроль безпечної експлуатації НБК.

Через значну кількість радіоактивних матеріалів зруйнованого реактора, що після 1986 року містяться в ґрунтах локальної зони об'єкта «Укриття», радіонуклідами значно забруднене гідрогеологічне середовище. Інтенсивність забруднення визначається постійним рухом підземних вод, зміненням їхнього рівня та швидкості. Враховуючи розміщення Чорнобильської АЕС в заплаві річки Прип'ять, в напрямку якої переміщуються підземні води, надзвичайно важливо наглядати за рівнем радіоактивного забруднення та умовами, від яких залежить здатність радіонуклідів переноситись підземними водами [125—127]. Для цього існує система радіогідроєкологічного моніторингу, що впродовж десятків років слідкує за станом підземних вод та оцінює вплив різних чинників на забруднення їх радіонуклідами.

### **4.1 Радіоактивні аерозолі в приземному шарі повітря локальної зони Чорнобильської АЕС**

Моніторинг радіоактивних аерозолів у приземному шарі повітря продиктований необхідністю контролю радіаційного впливу їх на персонал, який працює на

---

---

майданчику, оперативного прийняття рішень у разі виникнення аварійних ситуацій, а також оцінки впливу об'єкта «Укриття» на довкілля.

До побудови НБК забруднення приземного шару повітря в локальній зоні об'єкта «Укриття» та на прилеглій території промислового майданчика Чорнобильської АЕС зумовлювалося неорганізованими викидами аерозолів через отвори й нещільності легкої покрівлі та стін об'єкта «Укриття» і машинного залу. Було підтверджено, що між викидом РА та об'ємною активністю аерозолів у приземному шарі повітря локальної зони існує прямий кореляційний зв'язок. Викид РА об'єкта «Укриття» відбувався на висоті близько 50 м від поверхні землі через щілини й отвори в покрівлі загальною площею близько 120 м<sup>2</sup>. У 1998—2003 роках середній викид  $\Sigma\beta$ -активності становив від 696 до 1184 МБк/рік. Водночас, найбільші концентрації РА у приземному шарі повітря в розмірі 0,02 Бк/м<sup>3</sup> спостерігалися на майданчику на відстані 40—50 м від стін об'єкта «Укриття» в зоні аеродинамічної тіні. Внесок РА, що виносилися з об'єкта «Укриття», в загальний рівень забруднення повітря в локальній зоні міг сягати 70 % [128].

Другим за значущістю джерелом РА у приземному шарі повітря є забруднений радіонуклідами ґрунт. Внесок вторинного підйому пилу з поверхні майданчика об'єкта «Укриття» і довколишніх територій в забруднення приземного шару повітря становив до 30 %, залежно від метеорологічних умов. Окремі вимірювання активності аерозолів у повітрі в цьому напрямку розпочались у перші дні аварії, регулярні вимірювання — з 1998 року. За даними регламентного контролю 2006 року, на території локальної зони об'єкта «Укриття» об'ємна активність  $\alpha$ -активних аерозолів у повітрі становила, Бк/м<sup>3</sup>, від  $5,7 \cdot 10^{-4}$  до  $1,1 \cdot 10^{-2}$ ,  $\beta$ -активних — від  $1,9 \cdot 10^{-3}$  до  $2,1 \cdot 10^{-1}$  [128].

Внесок основних радіонуклідів в об'ємну активність аерозолів у повітрі майданчика, %, дорівнював: <sup>90</sup>Sr — 19,05; <sup>137</sup>Cs (конденсаційного) — 33,6; <sup>137</sup>Cs (паливного) — 33,6; <sup>238,239,240</sup>Pu — 0,43; <sup>241</sup>Pu — 13,03; <sup>241</sup>Am — 0,29. Розподілення по  $\alpha$ -випромінюючих нуклідах було приблизно таким, %: <sup>238+239+240</sup>Pu — 50, <sup>244</sup>C — 3; по  $\beta$ - і  $\gamma$ -випромінюючих нуклідах, %: <sup>90</sup>Sr + <sup>90</sup>Y — 52, <sup>137</sup>Cs — 31 %, <sup>241</sup>Pu — 14.

У всіх місцях проведення робіт із стабілізації (2002—2007 роки) дисперсність аерозолів — носіїв <sup>137</sup>Cs — змістилася в бік грубодисперсної фракції з аеродинамічним діаметром 3,5 мкм і більше [128].

Третій чинник, який максимально впливає на поведінку РА, — техногенний, пов'язаний з проведенням різного часу в локальній зоні будівельно-монтажних робіт за програмою перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему: зміцненням конструкцій вентиляційної труби ВТ-2 (1998), підсиленням балок Б1-Б2 (1999), монтажем модернізованої системи пригнічення пилу (2004), видаленням берми піонерної стіни (2007), стабілізаційними заходами (2008), облаштуванням майданчика під НБК (2009), демонтажем ВТ-2, будівництвом нової вентиляційної труби (2013) тощо. Ці роботи супроводжувалися інтенсивним рухом автотранспорту,

---

---

земляними, монтажними, зварювальними роботами, які значно погіршили радіаційну обстановку в локальній зоні АЕС.

Зазначимо, що інтенсивність виносу радіоактивних аерозолів об'єкта «Укриття» і, як наслідок, рівні забруднення повітря поблизу нього значною мірою залежать від сезонних чинників і метеорологічних умов. В осінньо-зимовий період винос аерозолів та їхня об'ємна активність у локальній зоні, як правило, були більшими, ніж у літній, тому що восени та взимку швидкість потоку повітря з об'єкта «Укриття» більша, ніж влітку, і зумовлена різницею температур всередині й зовні нього. В літній період значення об'ємної активності аерозолів у приземному шарі збігаються із значеннями об'ємної активності аерозолів на верхніх позначках (+36.000), що пояснюється ефектом вітрового підйому і перенесення аерозолів з підстиляючої поверхні довколишніх територій.

Останніми роками зберігається загальна тенденція щодо стабілізації досягнутого рівня забруднення повітря в локальній зоні і на майданчику об'єкта «Укриття». Відповідно до звітів про стан безпеки об'єкта «Укриття» багаторічний контроль об'ємної активності радіонуклідів у повітрі під час проведення різних експлуатаційних і монтажних робіт показує, що тимчасове збільшення рівня радіоактивного забруднення повітря в приміщеннях не впливає на загальний викид з об'єкта «Укриття», а зміна радіаційної обстановки під час виконання земляних робіт носить короточасний характер. При цьому значення об'ємної активності радіонуклідів у повітрі локальної зони не перевищують контрольних рівнів.

Розташування системи контроль стану РА (об'ємна активність у повітрі та випадіннях) наведено на рис. 4.1.

Проби аерозолів відбирають на фільтри ФПП-15-1,5. Швидкість фільтрації повітря — 8...12 тис. м<sup>3</sup> на добу. Період експозиції фільтрів — 13...20 діб, а під час виконання радіаційно небезпечних робіт, які супроводжувались погіршенням радіаційної ситуації в приземному шарі повітря (підйомом радіоактивного пилу), — 4...7 діб.

Активність радіонуклідів <sup>137</sup>Cs, <sup>154</sup>Eu, <sup>241</sup>Am ідентифікували і визначали за даними γ-спектрометричних вимірів. Активність α-випромінюючих (Σα <sup>238</sup>Pu, <sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu) і α-випромінюючих нуклідів (Σβ <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr + <sup>90</sup>Y і <sup>241</sup>Pu) розраховували за їхніми співвідношеннями з активністю <sup>241</sup>Am в базовому складі палива четвертого енергоблока на момент вимірювань [129—132]. Динаміку середньорічної об'ємної активності РА в приземному шарі повітря майданчика НБК за результатами спостережень у 1998—2020 роках на пунктах контролю АУ-1, АУ-2, АУ-3 наведено на рис. 4.2.

Аналізуючи динаміку об'ємної активності ΣРА в приземному шарі майданчика НБК, можна умовно виділити кілька періодів, які характеризуються впливом на радіаційну ситуацію в приземному шарі повітря різних джерел РА і пов'язані з техногенною діяльністю та будівельно-монтажними роботами.



Рис. 4.1 — План розташування точок контролю радіоактивних аерозолів у приземному шарі локальної зони Чорнобильської АЕС:

а — ФУ «Тайфун»; б — ФВУ GRAD-1,0;  
в — ФВУ «Wentmesa»; г — АУ-3 Південь



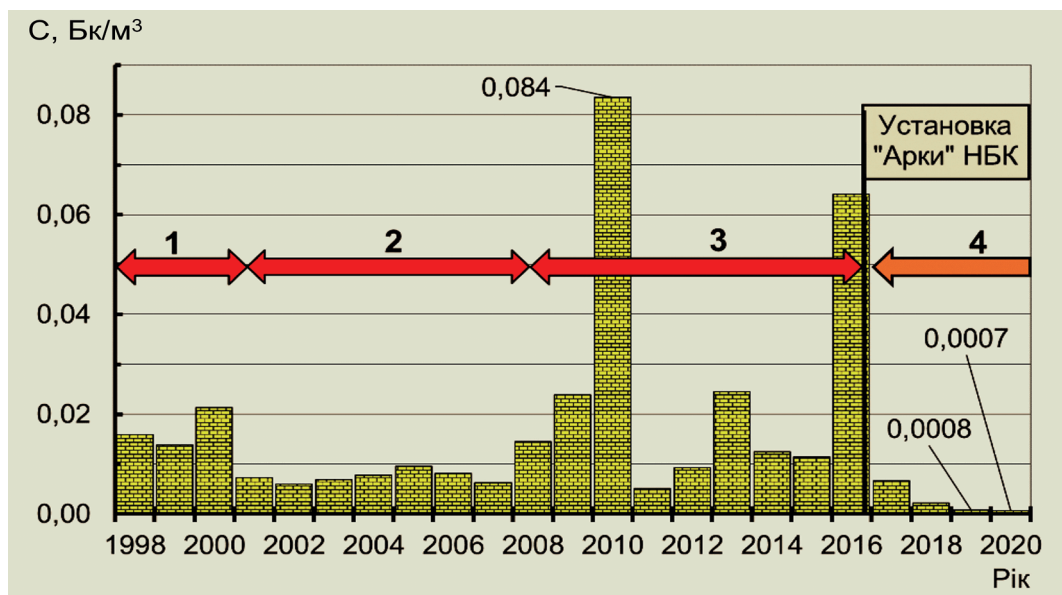


Рис. 4.2 — Зміна об'ємної активності  $\Sigma$ РА в приземному шарі повітря майданчика на різних етапах перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему

У перший період (рис. 4.2, 1) працював третій енергоблок Чорнобильської АЕС (до грудня 2000 року), провадились роботи із зміцнення конструкцій вентиляційної труби ВТ-2 (1998) та підсилення балок Б1-Б2 (1999).

У другому періоді (рис. 4.2, 2) була змонтована та введена в експлуатацію модернізована система пилопригнічення (2003—2007), виконані стабілізаційні заходи з підсилення нестабільних конструкцій (2005—2007).

Третій період (рис. 4.2, 3) — будівництво НБК: видалення берми піонерної стіни (2008), облаштування майданчика під монтаж НБК (2010), будівництво нової вентиляційної труби (2010), демонтаж ВТ-2, часткове обвалення покрівлі машинного залу об'єкта «Укриття» (2013), демонтаж окремих будівельних конструкцій об'єкта «Укриття» та зведення стін огорожувального контуру НБК (2016). Зауважимо, що 2010 року під час проведення земляних робіт, вилучення ґрунту під фундаментні стрічки НБК середньорічна об'ємна активність РА у повітрі локальної зони досягла максимального значення за весь період спостереження — 0,08 Бк/м³ [133].

Четвертий період (рис. 4.2, 4) — закінчення робіт з введення в експлуатацію НБК і експлуатація.

Із наведених на рис. 4.3 даних бачимо: якщо до побудови НБК у 2016 році середньорічні значення об'ємної активності  $\Sigma\alpha$  і  $\Sigma\beta$  в приземному шарі повітря майданчика

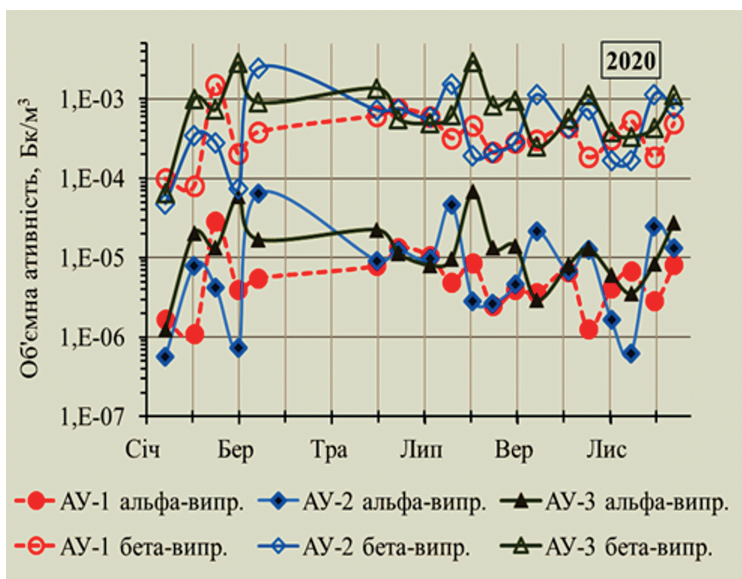
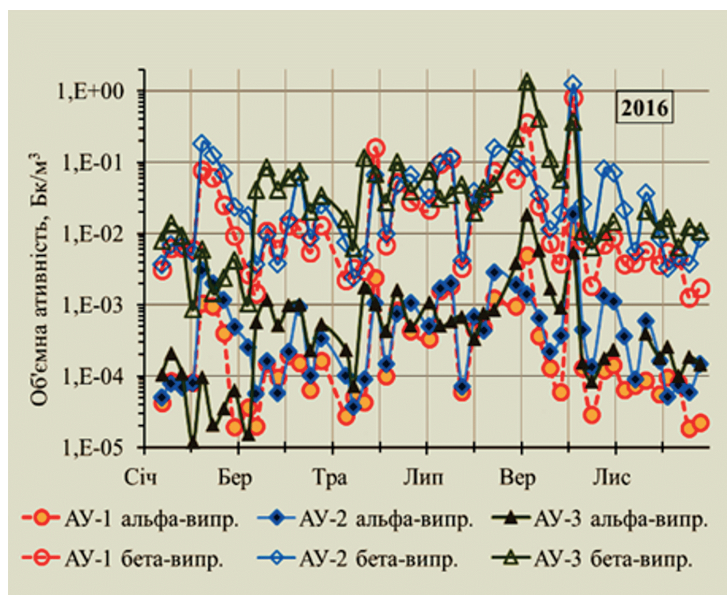


Рис. 4.3 — Об'ємні активності  $\Sigma\alpha$  і  $\Sigma\beta$  аерозолі в приземному шарі повітря локальної зони комплексу об'єкта «Укриття», 2016 та 2020 роки

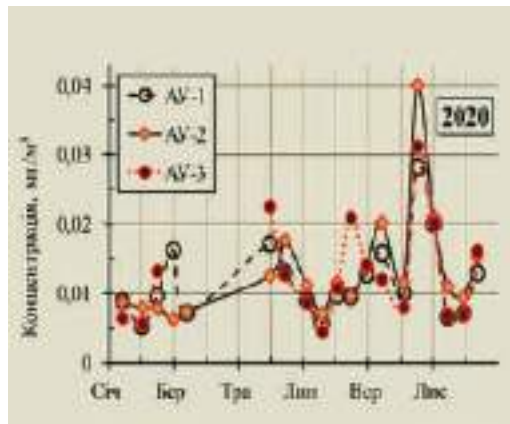
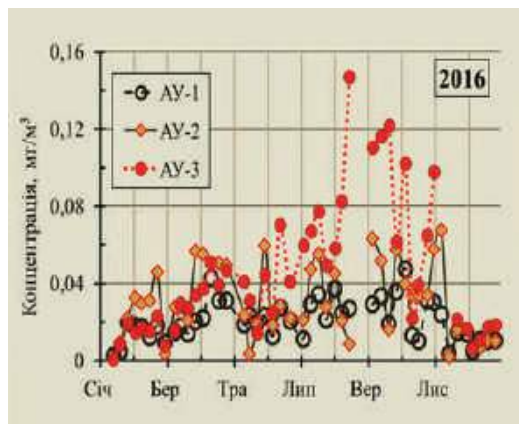


Рис. 4.4 — Концентрація пилу в приземному шарі повітря локальної зони об'єкта «Укриття», 2016 та 2020 роки

дорівнювали  $9,4 \cdot 10^{-4}$  і  $6,2 \cdot 10^{-2}$  Бк/м<sup>3</sup> відповідно [98], то після введення в експлуатацію НБК і закінчення упорядкування прилеглої території вони знизились майже на порядок і 2020 року сягли  $1,3 \cdot 10^{-5}$  та  $7,0 \cdot 10^{-4}$  Бк/м<sup>3</sup> відповідно. Максимальні значення  $\Sigma\alpha$  і  $\Sigma\beta$  в 2016 році зареєстровані на півдні локальної зони (АУ-3) з 29 серпня по 5 вересня і дорівнювали  $1,8 \cdot 10^{-2}$  і  $1,4$  Бк/м<sup>3</sup> відповідно.

Для урахування впливу вторинного пилопідйому під час проведення робіт на майданчику НБК оцінювали масову концентрацію пилу в приземному шарі повітря. Із наведених рис. 4.4 даних випливає, що коли 2016 року йшли інтенсивні будівельно-демонтажні роботи, середня концентрація пилу, мг/м<sup>3</sup>, на пунктах контролю АУ-1, АУ-2 і АУ-3 дорівнювала 0,021, 0,033, 0,047 відповідно, а середня концентрація пилу в локальній зоні — 0,033 мг/м<sup>3</sup>. Максимальна концентрація пилу 0,15 мг/м<sup>3</sup> спостерігалася з 8 по 15 серпня на АУ-3 [98].

2020 року концентрація пилу знизилась у 4,5 раза. Середня концентрація пилу, мг/м<sup>3</sup>, на АУ-1, АУ-2 і АУ-3 дорівнювала 0,012, 0,013, 0,013 відповідно, середня концентрація в локальній зоні — 0,012 мг/м<sup>3</sup>. Ці дані свідчать про відсутність інтенсивних робіт, які би спричинювали зростання вторинного пилопідйому.

Ще одним свідченням відсутності викидів з НБК є співвідношення радіонуклідів, які вказують на можливе джерело походження аерозолі, а також на ступінь трансформації паливних частинок і характер робіт, внаслідок яких генерується аерозоль. Після 2010 року в РА приземного шару повітря локальної зони співвідношення активностей  $^{137}\text{Cs}$  до  $^{241}\text{Am}$ , а також  $^{137}\text{Cs}$  до  $^{154}\text{Eu}$  зростає порівняно із співвідношеннями активностей цих нуклідів у базовому складі палива четвертого енергоблока [134].



Рис. 4.5 — Відносний внесок  $^{137}\text{Cs}$ , не пов'язаного з паливом, у сумарну активність  $^{137}\text{Cs}$  в РА приземного шару повітря локальної зони, 2000—2020 роки



Рис. 4.6 — Місця розміщення фільтровентиляційних установок

Отже, відбувається збагачення РА приземного шару повітря, не пов'язане з паливними частинками локальної зони  $^{137}\text{Cs}$ .

Після 2016 року внесок  $^{137}\text{Cs}$ , не пов'язаний з паливними частинками, в загальну активність  $^{137}\text{Cs}$  сталий і перевищує 50 % (рис. 4.5). Це свідчить про те, що вагомі викиди з НБК відсутні, а радіаційна ситуація в приземному шарі повітря на майданчику визначається пилопідйомом у ході техногенної діяльності на довколишніх територіях.



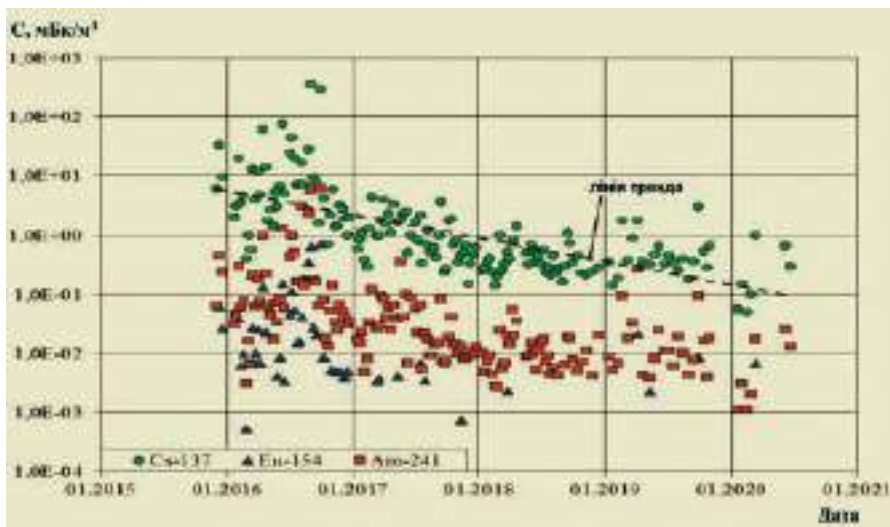


Рис. 4.7 — Об’ємна активність  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$  та  $^{241}\text{Am}$  у приземному шарі повітря на території, прилеглий до БК-2, 2015—2020 роки

Радіоактивні аерозолі в приземному шарі контролюються на відстані 600—1000 м у трьох точках фільтровентиляційними установками: ФВУ Grad-1.0 — на території, прилеглий до корпусу БК-2 (рис. 4.6, а); ФВУ «WENTMECA» — на території санпропускника СП-1430 (рис. 4.6. б); ФВУ «Тайфун» — на території адміністративного корпусу (рис. 4.6, в).

Спостерігається істотне зменшення об’ємної активності нуклідів в аерозолях приземного шару повітря з часом (рис. 4.7). Наприклад, якщо до побудови НБК об’ємна активність, мБк/м<sup>3</sup>,  $^{137}\text{Cs}$  у пробах повітря коливалася в діапазоні від  $5,0 \cdot 10^{-2}$  до 360;  $^{154}\text{Eu}$  — від  $5,3 \cdot 10^{-4}$  до 0,7;  $^{241}\text{Am}$  — від  $1,1 \cdot 10^{-3}$  до 6,2, то після введення 2020 року НБК в експлуатацію вона зменшилась на два порядки ( $^{137}\text{Cs}$  — від  $5,0 \cdot 10^{-2}$  до 1,0 мБк/м<sup>3</sup>;  $^{241}\text{Am}$  — від  $1,1 \cdot 10^{-3}$  до  $2,5 \cdot 10^{-2}$  мБк/м<sup>3</sup>). Аналогічні тренди на зниження об’ємної активності аерозолів в приземному шарі повітря спостерігаються і в інших точках контролю: біля санпропускника СП-1430 і адміністративного корпусу об’єкта «Укриття». Надалі активність аерозолів у приземному шарі повітря в локальній зоні також визначатиметься техногенними факторами.

Щоб розширити контроль впливу НБК на радіаційний стан прилеглої до НБК території на періоди до і безпосередньо під час насування НБК, встановили додаткові осаджувальні планшети для збору аерозольних атмосферних випадів, розташували їх біля північно-західного, південно-західного кутів та на сході (близько південно-східного кута) НБК (рис. 4.8).



Рис. 4.8 — Осаджувальні планшети в локальній зоні Чорнобильської АЕС:  
а — північно-західний кут; б — південно-західний кут; в — на сході

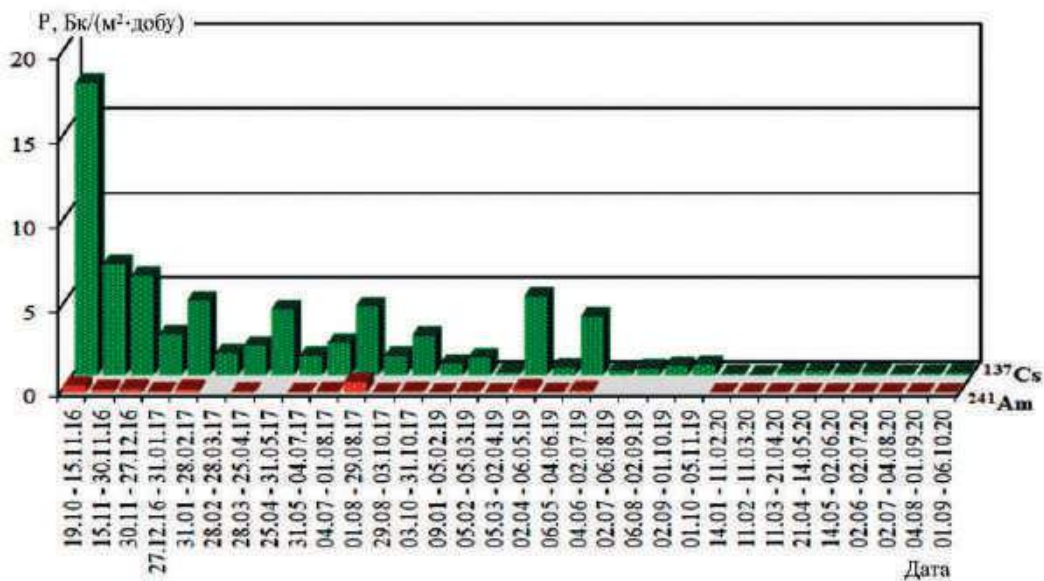


Рис. 4.9 — Щільність випадінь радіонуклідів на підстилаючу поверхню  
в північно-західній області локальної зони, 2016—2020 роки

---

---

Аналіз щільності випадінь  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{241}\text{Am}$  на підстиляючу поверхню локальної зони показав її різке, на декілька порядків, зменшення після зведення НБК (рис. 4.9):  $^{137}\text{Cs}$  — від  $17 \text{ Бк}/(\text{м}^2 \cdot \text{добу})$  в 2016 році до  $9,5 \cdot 10^{-3} \text{ Бк}/(\text{м}^2 \cdot \text{добу})$  у 2020-му;  $^{241}\text{Am}$  — від  $0,62 \text{ Бк}/(\text{м}^2 \cdot \text{добу})$  в 2017 році до  $2,9 \cdot 10^{-4} \text{ Бк}/(\text{м}^2 \cdot \text{добу})$  в 2020-му в північно-західній частині локальної зони.

Результати досліджень впливу нового безпечного конфайнмента на стан радіоактивного забруднення приземного шару атмосфери локальної зони Чорнобильської АЕС показали: до побудови НБК середньорічні значення об'ємної активності  $\Sigma\alpha$  і  $\Sigma\beta$  аерозолі приземного шару повітря локальної зони визначались викидами РА з об'єкта «Укриття» та техногенними роботами на майданчику, носили нестабільний характер і становили від  $0,01$  до  $0,084 \text{ Бк}/\text{м}^3$ . Після закінчення благоустрою території майданчика та введення НБК в експлуатацію концентрація їх знизилась 2020 року до  $1,3 \cdot 10^{-5}$  та  $7,0 \cdot 10^{-4} \text{ Бк}/\text{м}^3$  відповідно, тобто майже на два порядки;

аналогічні тренди на пониження (до двох порядків) об'ємної активності аерозолі спостерігаються і в точках контролю БК-2, санпропускника та адміністративного корпусу;

якщо до побудови НБК максимальна концентрація пилу на майданчику в 2016 році становила  $0,15 \text{ мг}/\text{м}^3$ , то в 2020-му вона зменшилась у 4,5 раза — до  $0,033 \text{ мг}/\text{м}^3$ , що свідчить про відсутність викидів з об'єкта «Укриття» та інтенсивних робіт, які б зумовили локальне зростання вторинного пилопідйому;

основний внесок у зменшення об'ємної активності аерозолі дало встановлення в проектне положення НБК, який повністю унеможливив надходження до довкілля викидів радіоактивного пилу з об'єкта «Укриття». Зменшилась концентрація радіонуклідів паливного походження з об'єкта, аерозоль збагатився  $^{137}\text{Cs}$ , знизилась щільність випадінь;

надалі активність аерозолі як на майданчику, так і в локальній зоні визначатиметься техногенними факторами: вторинним підйомом пилу з довколишніх радіоактивно забруднених територій, атмосферними параметрами (пориви вітру, перепади температур, опади) та лісовими пожежами.

#### 4.2 Результати радіогідроекологічного моніторингу

Радіогідроекологічний моніторинг охоплює:

спостереження за рівневим режимом підземних вод, напрямком та швидкістю їхнього руху;

контроль радіоактивного забруднення, умов надходження та міграції радіонуклідів із підземними водами;

контроль хімічного забруднення;

прогнози зміни радіаційних умов за допомогою математичних моделей радіогідроекологічних умов;

обґрунтування зміни системи спостережень з урахуванням зміни радіогідроекологічних умов території.

Дослідження проводяться більш ніж по 50 спостережних свердловинах (рис. 4.10), частина з яких опинилася під НБК після його встановлення в проектне положення.

На майданчику розташування НБК розвинений безнапірний водоносний горизонт, який приурочений до алювіальних ґрунтів першої надзаплавної тераси. Водомісні ґрунти представлено пісками середньої крупності, інколи крупними та мілкими з прошарками супіску та суглинку невеликої потужності. Потужність водоносного горизонту — від 28 до 30 м [135, 125].

Після встановлення НБК у проектне положення і, як наслідок, припинення потрапляння високоактивних водних скупчень із об'єкта «Укриття» в довкілля основним джерелом надходження радіонуклідів у підземні води стали процес інфільтрації атмосферних опадів через радіоактивно забруднені ґрунти зони аерації в підземні води і втрата води з водогінних комунікацій.

Іншим чинником, що суттєво вплинув на радіогідроекологічний стан майданчика об'єкта «Укриття», стало виведення з експлуатації водоймища-охолоджувача Чорнобильської АЕС, через що напрямок руху ґрунтових вод у районі об'єкта



Рис. 4.10 — Розташування свердловин радіогідроекологічного моніторингу на ділянці розташування НБК [138]



«Укриття» змінився з північного на північно-східний у бік заплави річки Прип'ять та залишкових озер на місці розташування колишнього водоймища-охолоджувача (рис. 4.11). Внаслідок цього збільшилась швидкість руху підземних вод до 40 м/рік і, відповідно, збільшилась швидкість міграції радіонуклідів з підземними водами, що розвантажуються в річку Прип'ять та в залишкові озера водоймища-охолоджувача [135].

Рівень підземних вод (РПВ) у районі НБК залежно від гіпсометрії денної поверхні коливається від 5 до 13 м [100]. За даними радіогідроекологічного моніторингу, в 2019-2020 роках були найнижчі РПВ за період спостережень, починаючи від 1994 року. Це зумовлено впливом як зниження рівнів у водоймищі-охолоджувачі Чорнобильської АЕС, так і аномально посушливими останніми роками.

Після насування арки НБК змінилися гідрохімічні умови в підземних водах внаслідок зменшення надходження блочних вод у довкілля. По свердловинах, розташованих під першим уступом каскадної стіни (див. рис. 4.10), концентрація основних іонів і мінералізації у верхній частині водоносного горизонту зменшилась у 1,5–4 рази [136]. Отже, встановлення НБК над об'єктом «Укриття» сприяло зменшенню хімічного забруднення підземних вод.

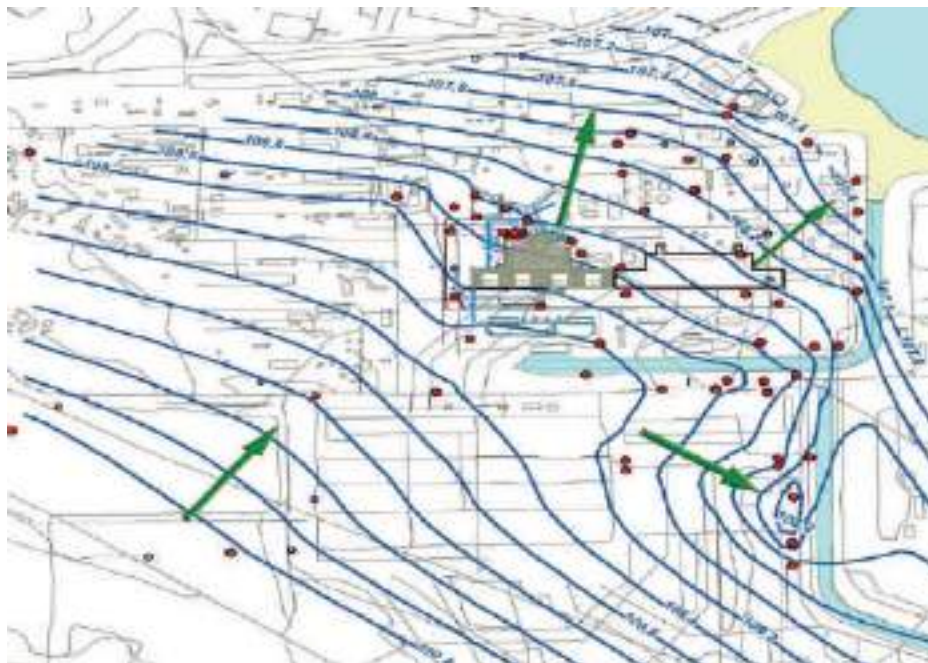


Рис. 4.11 — Карта гідроізогіпс ґрунтових вод у районі Чорнобильської АЕС станом на 10.02.2017 (стрілки показують напрямок руху підземних вод)

---

З метою визначення вмісту в пробах води  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $\text{U}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239} + ^{240}\text{Pu}$  та  $^{241}\text{Am}$  проводились радіохімічні дослідження підземних вод. Останніми роками спостерігається значне зростання об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у пробах підземних вод на окремих ділянках у районі об'єкта «Укриття» [100]. Високі концентрації  $^{90}\text{Sr}$  у пробах підземних вод (50 Бк/л і більше) локалізуються на шести ділянках (рис. 4.12), розташованих: 1) на північ від об'єкта «Укриття», де ґрунтові води пройшли шлях фільтрації під першим уступом каскадної стіни; 2) на захід від об'єкта «Укриття» у районі контрфорсної стіни; 3) на півночі локальної зони об'єкта «Укриття», де є ґрунтові води на ділянці купола розтікання; 4) на південь від НБК; 5) на захід від НБК; 6) біля східних стін третього енергоблока Чорнобильської АЕС.

Наведені на рис. 4.13 значення об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  та водневого показника (рН) у пробах ґрунтових вод зі свердловини 2-Г, що розташована на першій ділянці, свідчать про те, що з 2009 по 2017 роки об'ємна активність  $^{90}\text{Sr}$  збільшилась з 1,0...3,0 Бк/л до 260...340 Бк/л [135]. Зроблено припущення, що одним з пояснень значного зростання  $^{90}\text{Sr}$  у пробах ґрунтових є формування в підземних водах лужного середовища, при якому міграційна здатність  $^{90}\text{Sr}$  різко підвищується внаслідок зниження сорбційних властивостей скелета ґрунту.

Аналогічні закономірності простежувались і по інших свердловинах, наприклад по свердловині, що розташована під НБК (рис. 4.14).

Значення об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у пробах ґрунтових вод із свердловин, що розташовані нижче за течією від об'єкта «Укриття» (перша ділянка), тісно пов'язані з величиною рН і корелюють з концентраціями  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^{2-}$  у воді. Для цієї ділянки характерними є підвищення об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  при підвищенні рН понад 9,5 і умови, що позначені на рис. 4.13 і 4.14 як період III. Високі значення рН формуються безпосередньо в разі контакту ґрунтових вод з бетоном фундаментів споруд або внаслідок надходження до водоносного горизонту водних мас, що контактували з бетоном.

На четвертій і п'ятій ділянках високі значення об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  в пробах ґрунтових вод також обумовлені надходженням до безнапірного водоносного горизонту радіоактивно забруднених водних мас внаслідок зосередженої інфільтрації атмосферних опадів або втрат з водогінних комунікацій, формуванням у підземних водах високих концентрацій іона кальцію, що підвищує міграційну здатність  $^{90}\text{Sr}$  і до того ж підсилюється десорбцією з поверхні скелета ґрунту.

Як відомо, іони кальцію найсильніше зменшують поглинання радіостронцію твердою фазою ґрунту, а отже, є причиною зростання об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у воді водоносного горизонту, зокрема через підвищення ступеня десорбції з поверхні скелета ґрунту частинок раніше задепонованого  $^{90}\text{Sr}$ . Це підтверджується результатами відбору проб ґрунтових вод зі свердловини 21-1А, де спостерігається значне підвищення об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  — з 15 Бк/л у 2013 році до 880 Бк/л — у 2017-му (рис. 4.15).

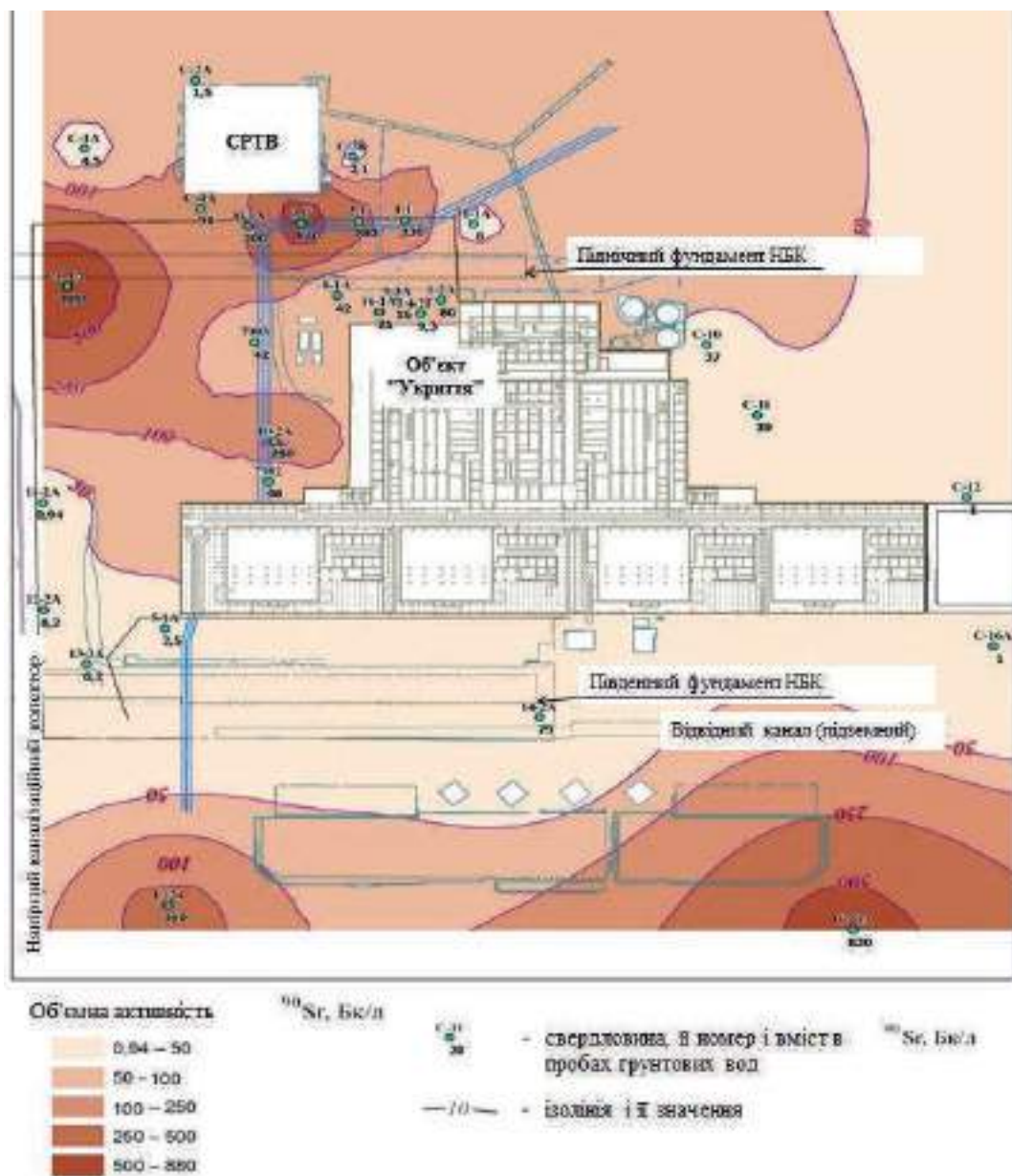


Рис. 4.12 — Карта розподілу об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  в ґрунтових водах, другий квартал 2017 року [100]

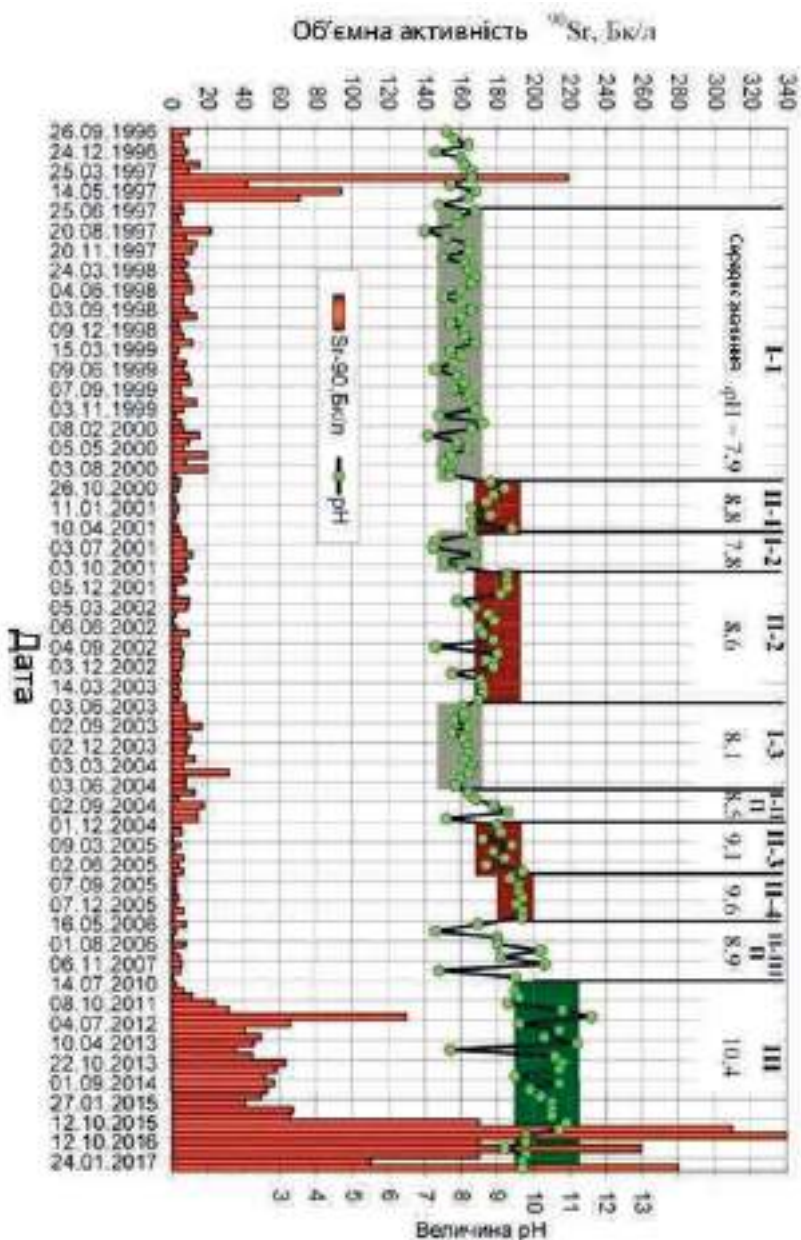


Рис. 4.13 — Об'ємна активність  $^{90}\text{Sr}$  і водневий показник у пробах ґрунтових вод зі свердловини 2-Г [138]



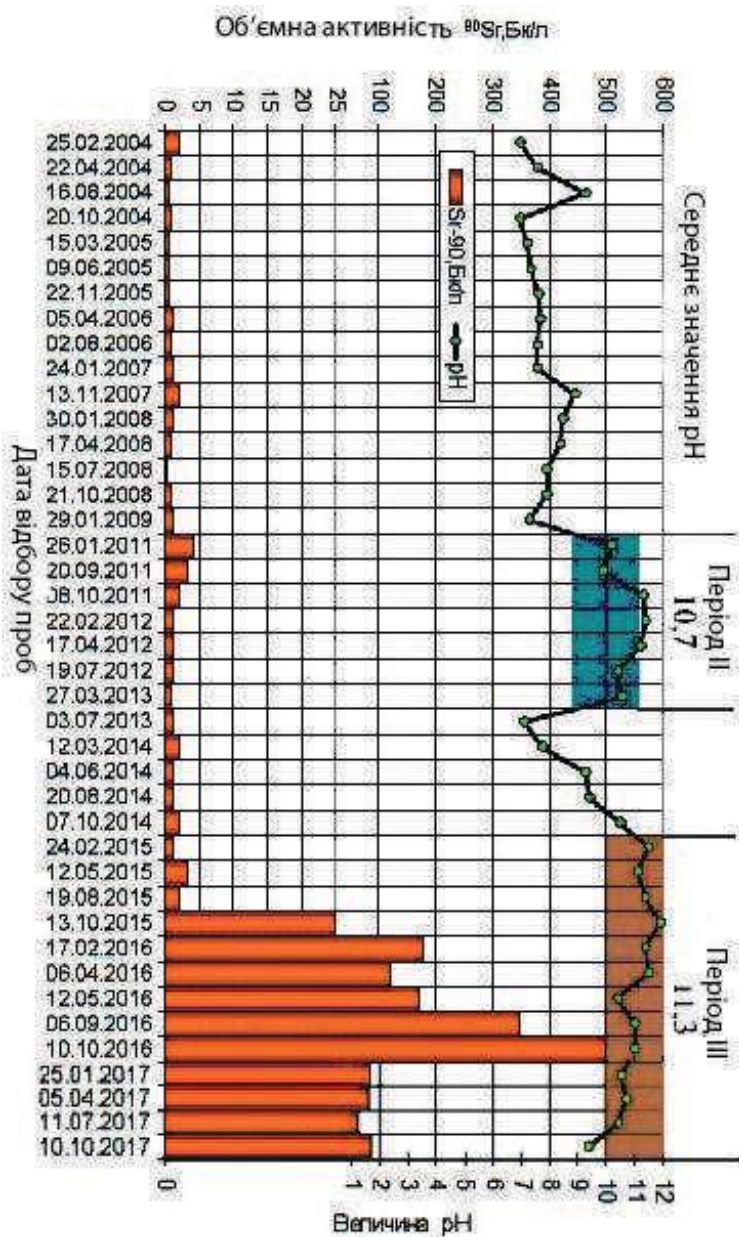


Рис. 4.14 — Об'ємна активність  $^{90}\text{Sr}$  і водневий показник у пробах ґрунтових вод зі свердловини 1-2А [138]

---

---

Одночасно із зростанням об'ємної активності радіонуклідів у пробах зі свердловини 21-1А має місце хімічне забруднення ґрунтових вод на цій ділянці. Порівняно з 2014 роком у 2017-му значно зросли концентрації іонів натрію — від 40 до 70 мг/л; іонів кальцію — від 16 до 87,8 мг/л (рис. 4.16); іонів гідрокарбонатів — від 52 до 213,6 мг/л; іонів сульфатів — від 76,8 до 63,4 мг/л. Збільшився і показник мінералізації — від 216 до 683,8 мг/л.

Аналіз наведених даних свідчить про те, що на ділянці розташування свердловини є додаткові джерела радіоактивного та хімічного забруднення ґрунтових вод. Найімовірніше, що цими джерелами є втрата стічних вод з напірного каналізаційного колектора з подальшим надходженням їх до ґрунтових вод.

Концентрація  $^{137}\text{Cs}$  в пробах ґрунтових вод із спостережних свердловин зафіксована в діапазоні від 0,3 до 42 Бк/л у 2107 році та від 0,34 до 19 Бк/л у 2018-му. Максимальні концентрації  $^{137}\text{Cs}$  спостерігаються на трьох ділянках поблизу НБК (рис. 4.17). На ділянці, розташованій біля будівлі сховища рідких і твердих відходів (СРТВ), одним із джерел забруднення підземних вод є надходження дощових вод з даху цієї будівлі та інфільтрація їх через радіоактивно забруднені ґрунти зони аерації. Джерелом забруднення підземних вод у свердловинах, розташованих з північного боку об'єкта «Укриття» в районі першого уступу каскадної стіни, є блочні води. Про це свідчать високі концентрації хімічних елементів і сполук у пробах з цих свердловин, характерних для блочних вод об'єкта «Укриття». Підвищені концентрації  $^{137}\text{Cs}$  у свердловинах, розташованих поблизу західного торця машинного залу, можуть бути наслідком як зосередженої інфільтрації атмосферних опадів, так і втрат з водогінних комунікацій.

Раніше для оцінки умов надходження радіоактивно забруднених вод з приміщень зруйнованого блока до ґрунтових вод за «природний» індикатор застосовували тритій. Серед джерел забруднення підземних вод тритій в істотній кількості детектується тільки в блочних водах. На місця радіоактивного забруднення водоносного горизонту через надходження блочних вод і на негерметичність об'єкта «Укриття» (рис. 4.18) вказувала висока концентрація тритію нижче за течією ґрунтових вод від об'єкта «Укриття» (перший уступ каскадної стіни).

Після встановлення НБК максимальна концентрація тритію знизилася з 1070 до 53,2 Бк/л (рис. 4.19) завдяки зменшенню надходження блочних вод до довкілля внаслідок припинення доступу атмосферних опадів всередину об'єкта «Укриття».

Разом з тим, у другій половині 2018 року через виведення з експлуатації водопищика-охолоджувача Чорнобильської АЕС і зумовленої цим зміни напрямку руху підземних вод з північного на північно-східний зафіксовано новий ореол розповсюдження тритію, що підтверджується його наявністю у свердловині, яка розташована в північно-східному напрямку від об'єкта «Укриття» (рис. 4.19).

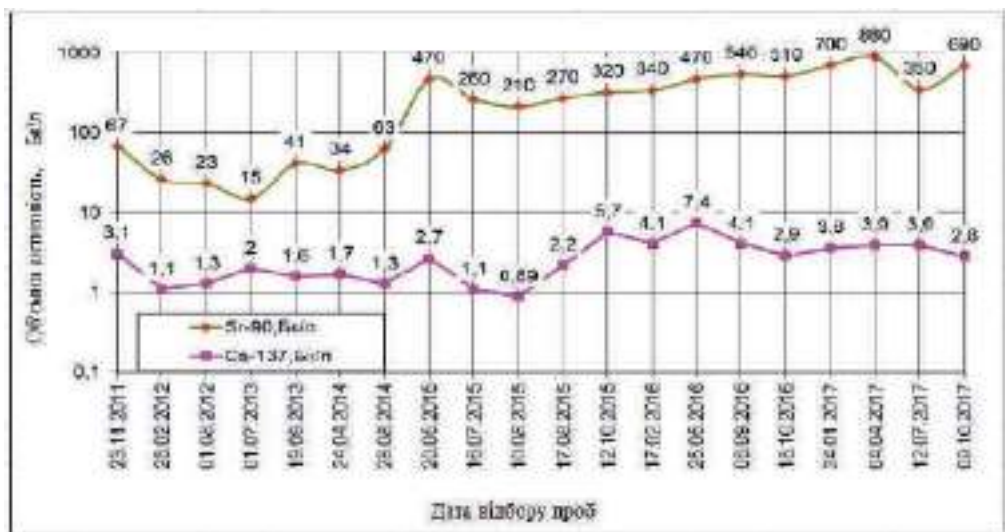


Рис. 4.15 — Об'ємна активність  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  у пробах ґрунтових вод із свердловини 21-1А [100]

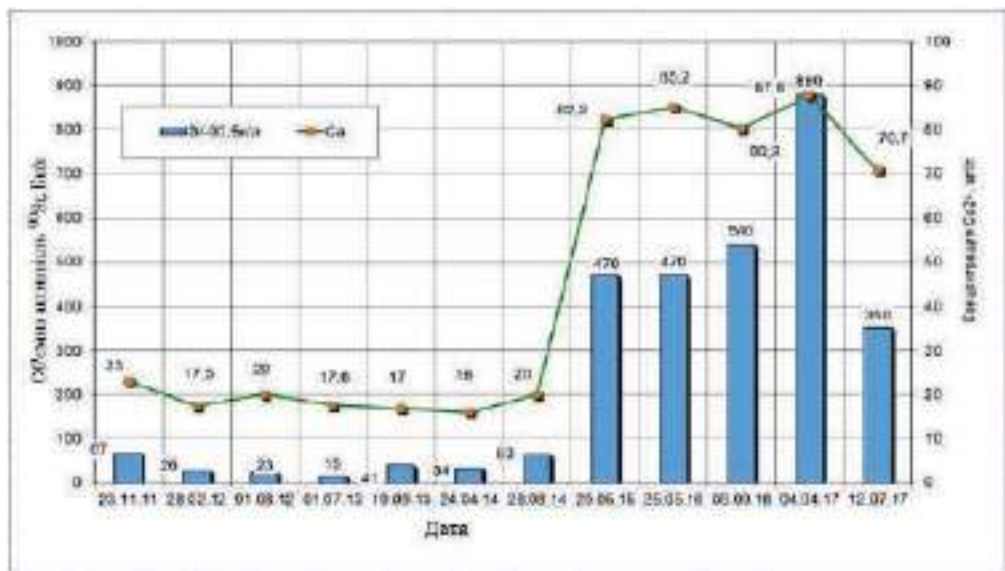


Рис. 4.16 — Вміст іонів кальцію та об'ємна активність  $^{90}\text{Sr}$  у пробах води зі свердловини 21-1А [100]

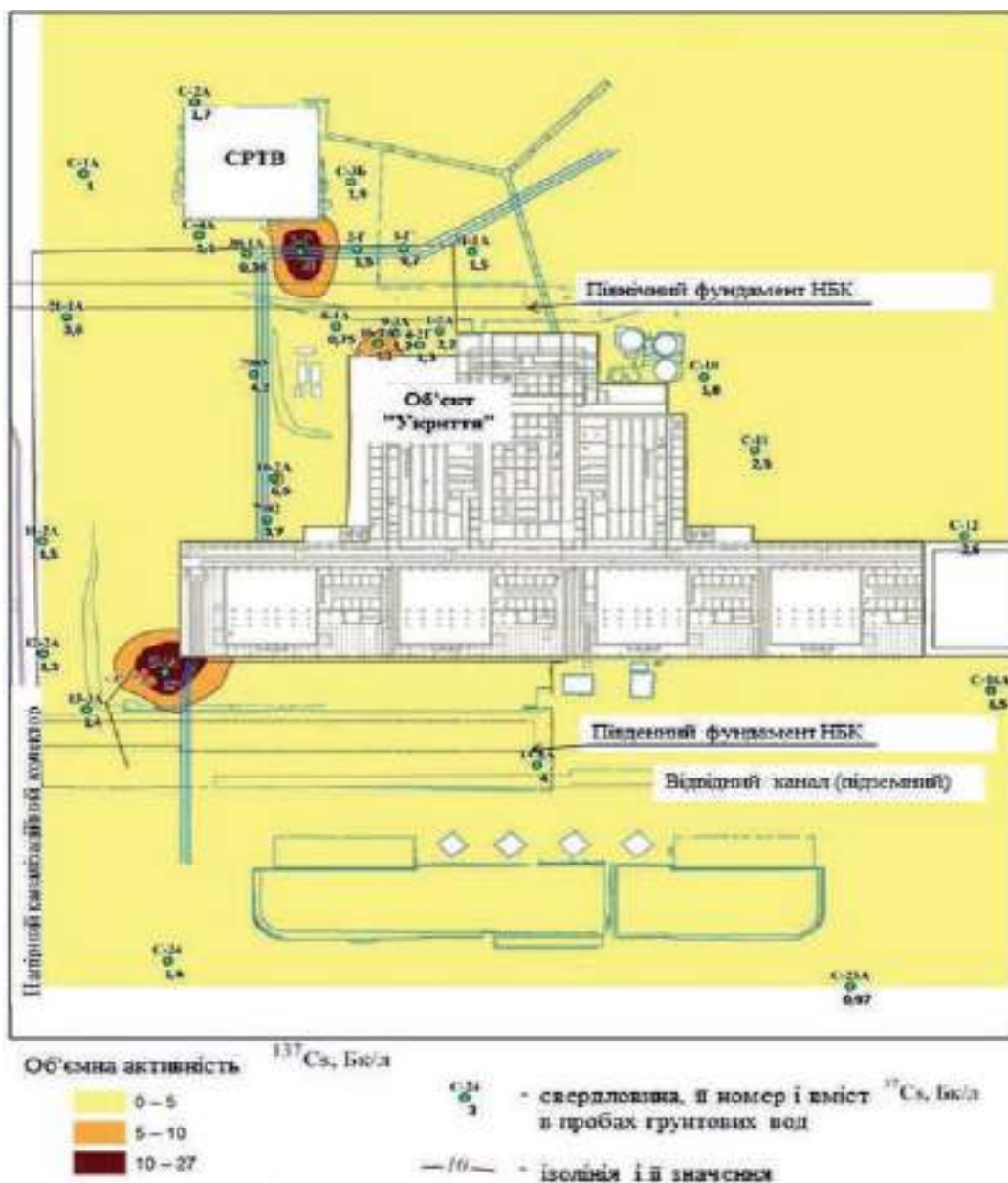


Рис. 4.17 — Карта розподілу об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$  в ґрунтових водах у районі об'єкта «Укриття», перший квартал 2017 року [100]



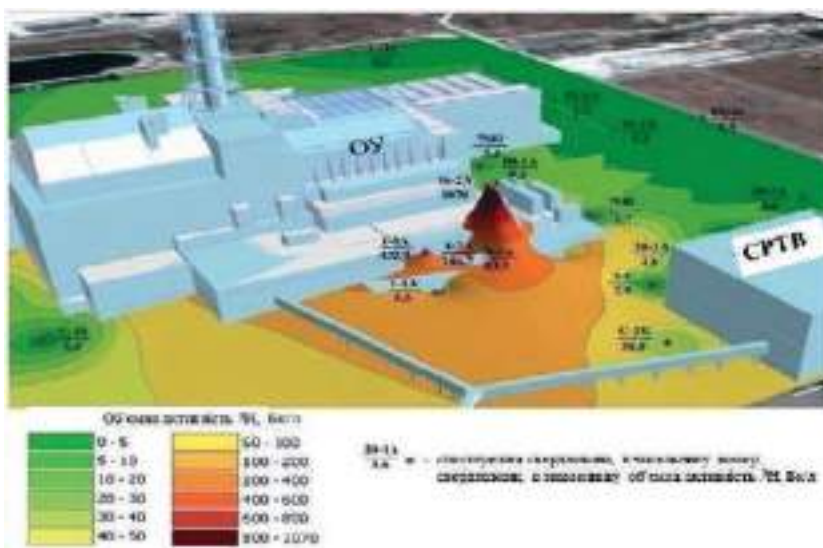


Рис. 4.18 — Ореол розповсюдження тритію в підземних водах, 2013 рік [100]

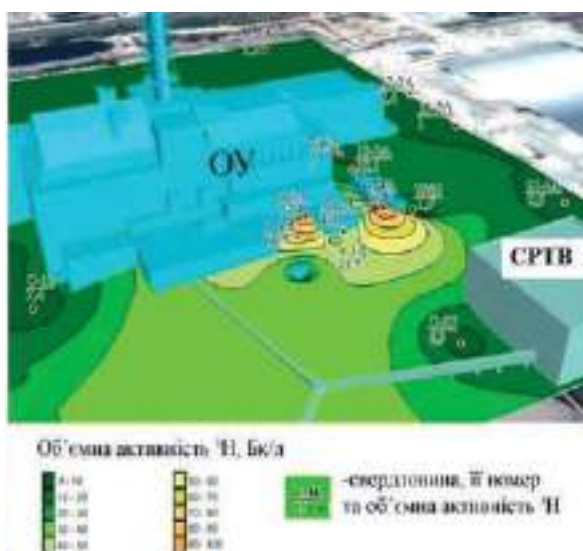


Рис. 4.19 — Ореол розповсюдження тритію в підземних водах, 2018 рік (після насування арки) [100]

---

Порівняно з даними 2016 року, після насування НБК зменшено від двох до чотирьох разів об'ємну активність тритію по свердловинах, які розташовані на першому уступі каскадної стіни під НБК (рис. 4.20, 4.21). Власне, зниження концентрацій тритію відбувалося і до насування арки. Але по деяких свердловинах темпи зниження різко прискорились саме після установа НБК в проектне положення.

Концентрація урану в ґрунтових водах навколо НБК в 2017 і 2018 роках змінювалась у межах від 0,02 до 26,3 мкг/л (рис. 4.22). Найбільші значення концентрації урану виявлені в пробах із свердловин, розташованих з північного боку (на першому уступі каскадної стіни) від об'єкта «Укриття» та із західного. Про наявність паливного урану в підземних водах можна судити за співвідношенням активностей  $^{234}\text{U}$  та  $^{238}\text{U}$  [137]. Для природного урану ця величина дорівнює переважно 1,0.

Для найзабрудненіших проб підземних вод співвідношення активностей  $^{234}\text{U}$  та  $^{238}\text{U}$  становило від 2,1 до 2,6, що говорить про присутність паливного урану (для якого характерно співвідношення активностей  $^{234}\text{U}$  та  $^{238}\text{U}$  в межах від 1,69 до 3,06) [137]. Крім того, в пробах міститься  $^{236}\text{U}$ , який належить виключно до паливного урану. Це свідчить про те, що забруднення підземних вод ураном відбулося через вихід у доквілля блочних вод з об'єкта «Укриття» до встановлення НБК.

Починаючи з 2010 року спостерігалось підвищення концентрації урану в пробах води зі свердловини 2-Г (від 0,18 до 11,5 мкг/л), розташованої поруч з північним фундаментом арки. На цій ділянці виконувались інтенсивні земляні роботи з улаштування котловану під північний фундамент НБК. Коли дощові води потрапляли на радіоактивно забруднені ґрунти, утворювались радіоактивно-забруднені водні маси, які потрапляли у підземні води. Після закінчення будівельних робіт і встановлення НБК в проектне положення в 2017 році концентрація урану знизилась до 4,2 мкг/л (рис. 4.23).

Розподіл концентрацій  $^{238}\text{Pu}$  в ґрунтових водах довкола об'єкта «Укриття» наведено на рис. 4.24, а розподіл концентрацій  $^{239} + ^{240}\text{Pu}$  — на рис. 4.25. Після встановлення НБК найвищі значення об'ємної активності  $^{238}\text{Pu}$  (до 0,053 Бк/л) та об'ємної активності  $^{239} + ^{240}\text{Pu}$  (до 0,14 Бк/л) були зафіксовані 2017 року у свердловинах, розташованих з північного боку об'єкта «Укриття». Об'ємна активність  $^{241}\text{Am}$  (рис. 4.26) в пробах ґрунтових вод змінюється від 0,00058 до 0,14 Бк/л.

З огляду на характер розподілу концентрації  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239} + ^{240}\text{Pu}$  і  $^{241}\text{Am}$  у ґрунтових водах максимальні значення цієї величини зосереджені з північного боку об'єкта «Укриття», тобто в напрямку руху ґрунтових вод, і сформувалися через вихід блочних вод до встановлення НБК. Очікується, що з часом концентрація цих радіонуклідів зменшуватиметься.

За результатами проведених досліджень [100, 135—138] можна зробити такі висновки щодо впливу НБК на стан підземних вод:

після встановлення НБК в проектне положення вплив блочних вод об'єкта «Укриття» на забруднення підземних вод практично втратив актуальність. Основним

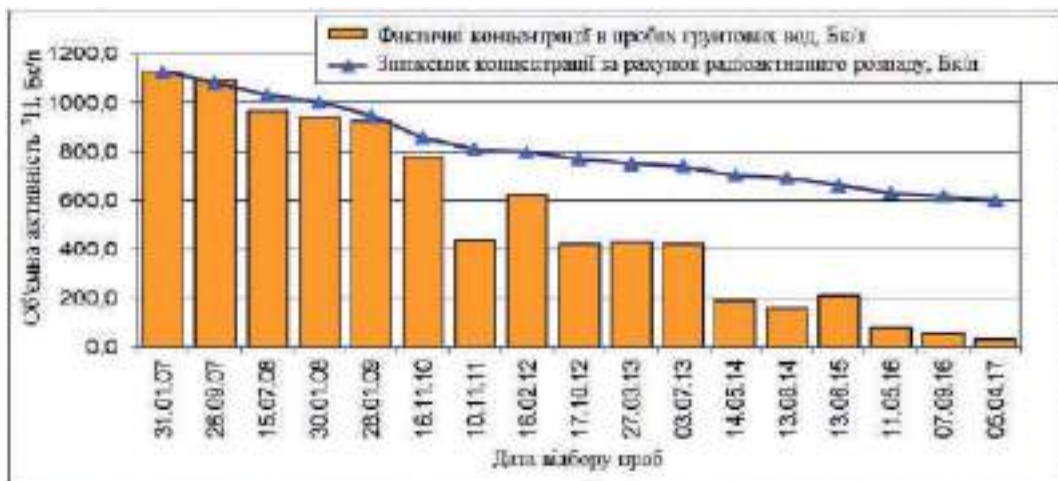


Рис. 4.20 — Об'ємна активність тритію в пробах ґрунтових вод із свердловини 1-3А [100]

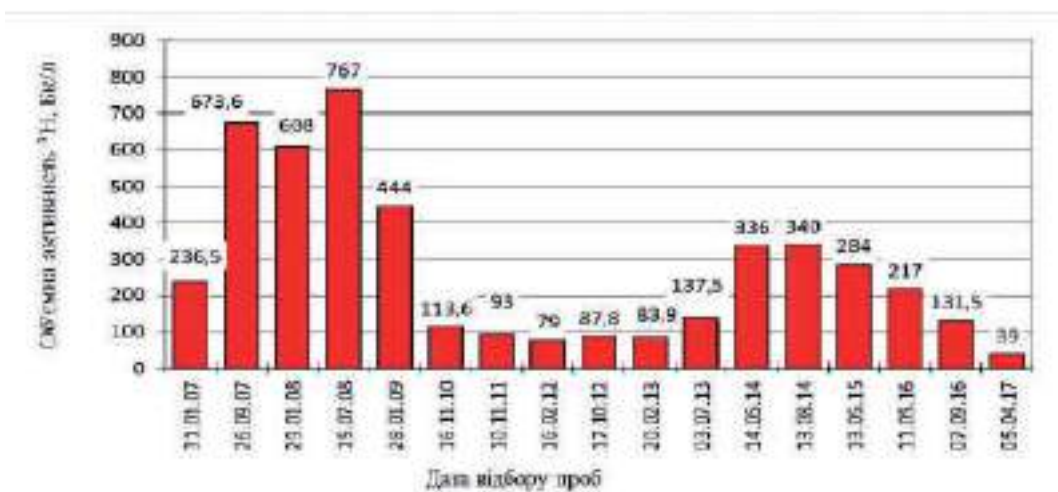
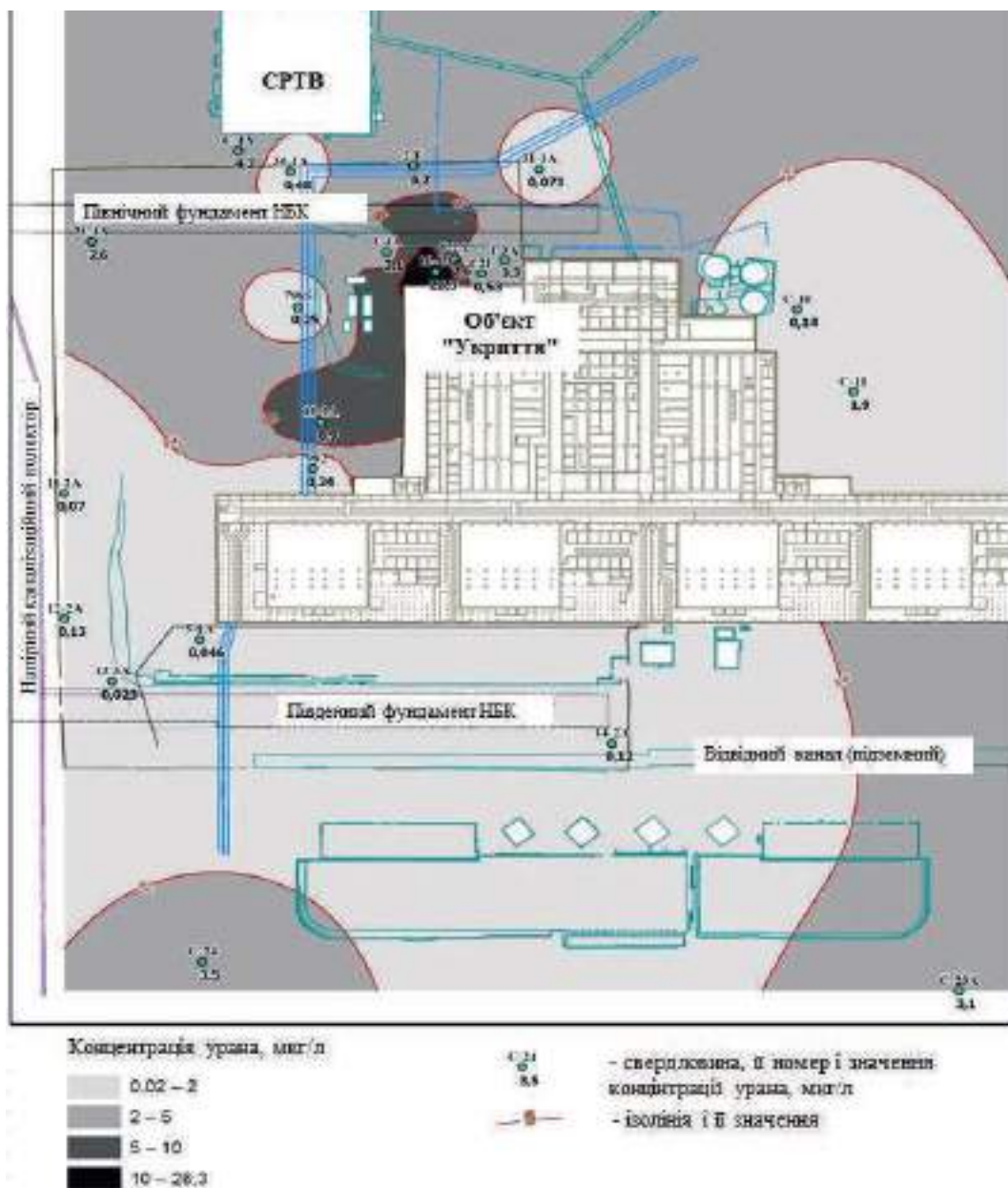


Рис. 4.21 — Об'ємна активність тритію в пробах ґрунтових вод із свердловини 9-3А [100]





джерелом надходження радіонуклідів у підземні води стали інфільтрація атмосферних опадів через радіоактивно забруднені ґрунти зони аерації, а також втрата води з водогінних комунікацій, що суттєво сприяло поліпшенню гідрохімічних та радіоекологічних умов у підземних водах;

внаслідок виведення з експлуатації водоймища-охолоджувача Чорнобильської АЕС напрямок руху ґрунтових вод на майданчику НБК змінився з північного на північно-східний;

однією з причин збільшення концентрації радіонуклідів, зокрема  $^{90}\text{Sr}$ , у підземних водах на окремих ділянках майданчика НБК стало формування в підземних водах лужного середовища ( $\text{pH} > 9,5$ ) та високих концентрацій іона кальцію, внаслідок чого міграційна здатність  $^{90}\text{Sr}$  різко підвищується через зниження сорбційних властивостей скелета ґрунту;

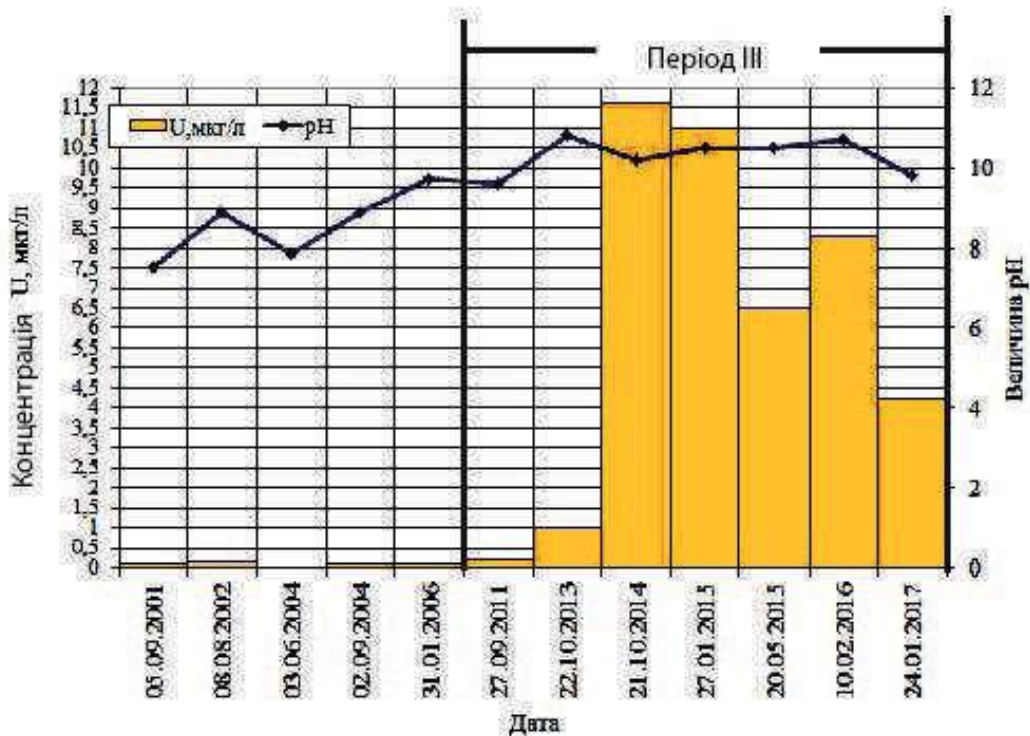


Рис 4.23 — Концентрація урану в пробах ґрунтових вод із свердловини 2-Г [138]

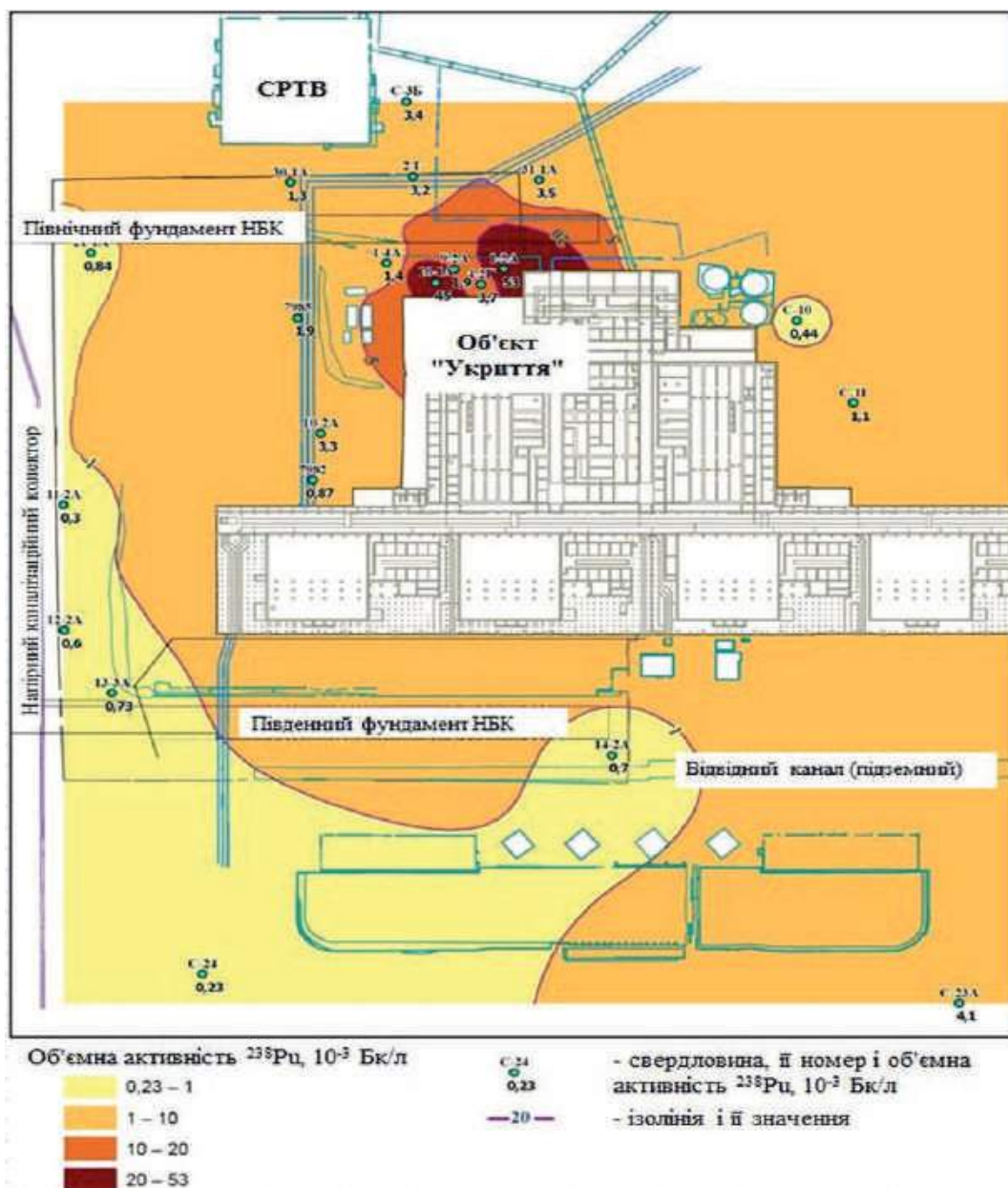
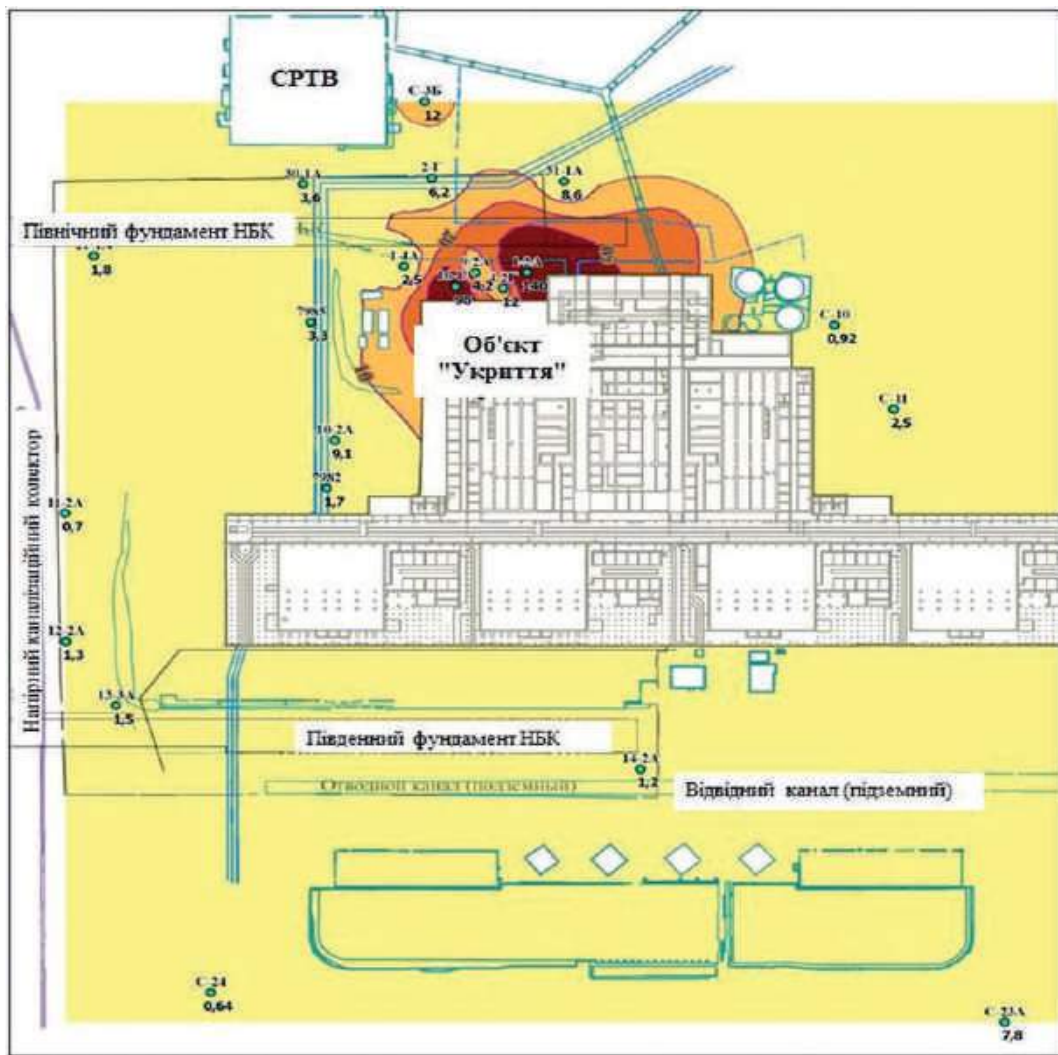
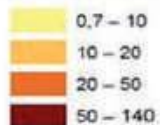


Рис. 4.24 — Карта розподілу об'ємної активності  $^{238}\text{Pu}$  в ґрунтових водах у районі об'єкта «Укриття» [100]



Об'ємна активність  $^{238-240}\text{Pu}$ ,  $10^{-3}$  Бк/л



С. 24  
0.64

- свердловина, її номер і об'ємна активність  $^{238-240}\text{Pu}$ ,  $10^{-3}$  Бк/л

— 20 — - ізолінія її значення

Рис. 4.25 — Карта розподілу об'ємної активності  $^{239+240}\text{Pu}$  в ґрунтових водах у районі об'єкта «Укриття» [100]

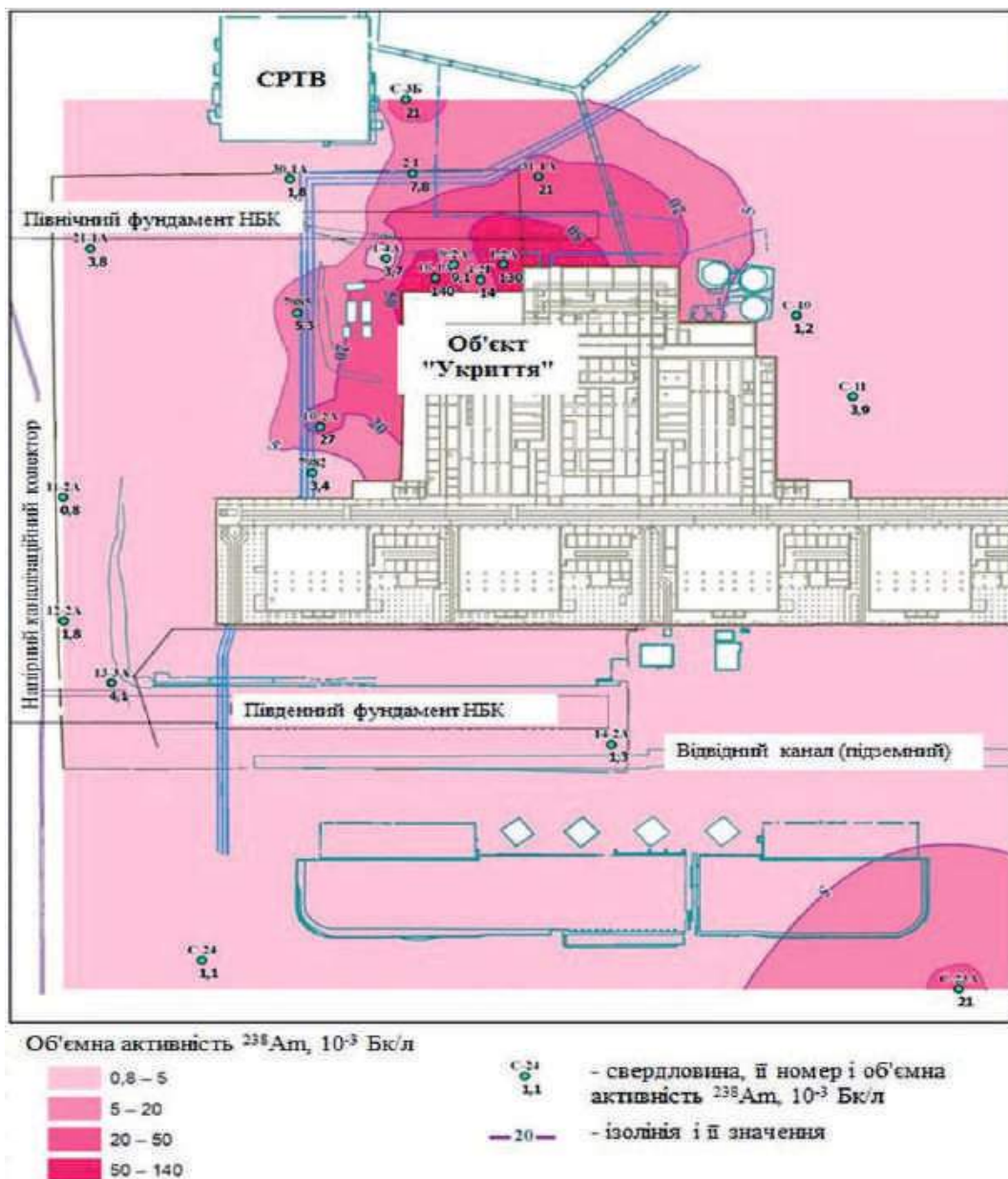


Рис. 4.26 — Карта розподілу об'ємної активності  $^{241}\text{Am}$  в ґрунтових водах у районі об'єкта «Укриття» [100]



---

---

попередньо стверджується, що високі значення рН формуються при контакті ґрунтових вод з бетоном фундаментів споруд на майданчику НБК. У разі підвищення рН ґрунтових вод до 9,5—10,0 через корозію бетону пальового фундаменту НБК, що перекриває частину водоносного горизонту, можливе значне збільшення об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$ , урану та трансуранових елементів. Проте це твердження потребує додаткового обґрунтування в ході досліджень у рамках радіогідроекологічного моніторингу;

зважаючи на те, що на окремих ділянках поверхні майданчика НБК склалися сприятливі умови для зосередженої інфільтрації атмосферних опадів через радіоактивно забруднені ґрунти зони аерації в підземні води, одним із заходів, який може зменшити радіоактивне забруднення підземних вод, є регулювання поверхневого стоку атмосферних опадів улаштуванням зливових каналізаційних колекторів;

оскільки при водневому показнику підземних вод  $\text{pH} = 8,5 \dots 9,5$  спостерігається зменшення об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$ , треба проаналізувати можливість практичної реалізації варіанта щодо підтримання в підземних водах цих значень, що сприятиме затримці поширення  $^{90}\text{Sr}$  з підземними водами поза межами майданчика НБК та в цілому поза межами промислового майданчика Чорнобильської АЕС.

---

## **Розділ 5. НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ СУПРОВІД ДІЯЛЬНОСТІ З ПЕРЕТВОРЕННЯ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ» НА ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНУ СИСТЕМУ**

Незвичайність і складність науково-технічних проблем, пов'язаних як з ліквідацією самої аварії, що сталася 26 квітня 1986 року на четвертому енергоблоці Чорнобильської АЕС, так і з ліквідацією її наслідків, зумовили залучити до їх вирішення найкращі наукові та інженерні сили. Науково-технічний супровід робіт на зруйнованому енергоблоці розпочався 1986 року одночасно з проектуванням і будівництвом об'єкта «Укриття» [2].

У перші дні травня 1986 року у м. Чорнобилі створюється оперативна група Інституту атомної енергії (ІАЕ) ім. І. В. Курчатова, яка виконувала функції наукового керівництва робіт з ліквідації наслідків аварії. Основні наукові напрями діяльності групи охоплювали дослідження зруйнованого блока, оцінку ступеня ядерної та радіаційної небезпеки, розробку рекомендацій щодо їх зниження, визначення кількості та складу радіоактивності у викиді на активній стадії аварії, розробку рекомендацій щодо дезактивації споруд і територій. Як науковий керівник ІАЕ виконував дослідні роботи та забезпечував проєктантів і будівельників розрахунками й іншими матеріалами протягом усього періоду проєктування та будівництва об'єкта «Укриття» [1].

У середині травня 1986 року Урядова комісія ухвалює рішення про довготривалу консервацію зруйнованого енергоблока з метою запобігання викиду радіонуклідів у довкілля і зменшення впливу проникної радіації на майданчику Чорнобильської АЕС.

З огляду на потребу наукового супроводу експлуатації об'єкта «Укриття» заступник директора ІАЕ акад. Легасов Валерій Олексійович виступає з ініціативою щодо організації в м. Чорнобиль Комплексної експедиції при Інституті. Для забезпечення наукового та проєктного супроводу робіт на об'єкті «Укриття», а також координації науково-дослідних робіт, що виконувались у зоні Чорнобильської АЕС, наприкінці 1987 року наказом Мінсередмашу СРСР створюється Комплексна експедиція при



Легасов В. О.



Веліхов Є. П.



Бар'яхтар В. Г.



Карасьов В. С.

ІАЕ ім. І. В. Курчатова. Її основними завданнями стали наукові дослідження щодо гарантування безпечного стану об'єкта «Укриття» і розробка рекомендацій з удосконалення систем контролю, вивчення радіаційного стану в контрольованій зоні, організація та виконання конструкторських і проектних робіт, виконання будівельно-монтажних робіт і забезпечення наукових досліджень.

Після здобуття Україною незалежності президент Російського наукового центру «Курчатовський інститут» в особі акад. Веліхова Євгена Павловича спільно з віце-президентом Академії наук України акад. Бар'яхтаром Віктором Григоровичем пропонують створити в системі АН України Міжгалузовий науково-технічний центр (МНТЦ) «Укриття» в м. Чорнобиль.

МНТЦ «Укриття» НАН України, заснований відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України № 55 від 04.02.1992, стає правонаступником Комплексної експедиції при ІАЕ ім. І. В. Курчатова. Перший керівник МНТЦ «Укриття» д-р фіз.-мат. наук, проф. Карасьов Володимир Сергійович з перших днів аварії на четвертому енергоблоці був активним учасником ліквідації її наслідків. Він виконав велику роботу з діагностування післяаварійного стану третього енергоблока та аналіз можливості його подальшої експлуатації. Під його керівництвом колектив МНТЦ «Укриття» в найкоротші строки зміг створити технічну базу і розгорнути діяльність з вирішення складних завдань наукового керівництва роботами щодо забезпечення поточної та довгострокової безпеки об'єкта [140].

Із 1992 року МНТЦ «Укриття» бере на себе функції наукового керівника і генерального проектувальника робіт з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему, а з 1993 року — і функції наукового керівника робіт зі зняття з експлуатації

енергоблоків Чорнобильської АЕС. Основним науковим і практичним результатом діяльності МНТЦ «Укриття» є розробка рішень щодо поточного забезпечення об'єкта «Укриття» протягом усього часу його існування.

У травні 1993 року рішенням Президії НАН України генеральним директором МНТЦ «Укриття» призначається д-р фіз.-мат. наук, проф. Токаревський Володимир Васильович.

У 1996 році на чолі МНТЦ «Укриття» стає чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф. Ключников Олександр Олександрович. Під його науковим керівництвом реалізуються багатопланові дослідження, результатом яких стала розробка понад 100 зразків унікальних приладів і установок, що знайшли застосування в різних галузях науки і техніки. Як керівник штабу Академії наук України в м. Чорнобилі він проводить наукові дослідження безпосередньо на зруйнованому енергоблоці. 2011 року Указом Президента України О. О. Ключникову було присвоєно звання Героя України за визначний особистий внесок у зміцнення безпеки вітчизняної атомної енергетики, а також багаторічну плідну наукову діяльність.

Для виконання робіт за проектом SIP 1997 року створюється український консорціум «КСК», до складу якого увійшли МНТЦ «Укриття», Київський проектно-конструкторський інститут «Енергопроект» і Науково-дослідний інститут будівельних конструкцій. Згодом у співпраці з компаніями Morrison Knudsen Ltd. (США) та BNFL Engineering Ltd. (Велика Британія) створюється міжнародний консорціум CHERNOBYL. Фахівці консорціуму детально проаналізували стан будівельних конструкцій об'єкта «Укриття»,



Токаревський В. В.



Ключников О. О.



---

---

за результатами якого обґрунтовано обсяг стабілізаційних заходів та розроблено концептуальний проект щодо їх реалізації, сформульовано концептуальні проектні критерії та вимоги до нового безпечного конфайнмента, запропоновано стратегію його спорудження.

Далі міжнародний консорціум у складі Bechtel International Systems (США), Electricite' de France (Франція), Battelle Memorial Institute (США), МНТЦ «Укриття», Київського проектно-конструкторського інституту «Енергопроект» і Науково-дослідного інституту будівельних конструкцій на основі варіанта «Арка» виконує техніко-економічне обґрунтування (концептуальний проект) НБК, затверджене розпорядженням Кабінету Міністрів України.

У результаті проведення робіт за першочерговими проектами пропонується і виконується комплекс заходів щодо підвищення довговічності, надійності та ефективності конструкцій з метою збереження або підвищення рівня безпеки об'єкта. Етап підготовки до перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему охоплює будівництво НБК, створення дистанційно керованих механізмів, розробку та апробацію технологій вилучення ПВМ, створення інфраструктури для поводження з вилученими відходами. Консорціум «КСК» розробляє проектну документацію щодо стабілізації будівельних конструкцій, яка стала першим великим проектом у реалізації основних завдань SIP.

За час свого існування МНТЦ «Укриття» досяг значних результатів у дослідженнях із забезпечення ядерної та радіаційної безпеки об'єкта «Укриття» і енергоблоків Чорнобильської АЕС, проектуванні установок щодо поводження з ядерними матеріалами та РАВ тощо. Фактично МНТЦ «Укриття» став сучасним інститутом з висококваліфікованими фахівцями, підрозділи якого забезпечені відповідним обладнанням, стендами і системами контролю. Тому 2004 року Постановою Президії НАН України МНТЦ «Укриття» перетворено на Інститут проблем безпеки атомних електростанцій у складі Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України. Цією ж Постановою директором Інституту призначається О. О. Ключников і затверджуються напрями наукової діяльності установи: ефективність і безпека АЕС, технології утилізації РАВ, розробка та впровадження технологій зняття з експлуатації енергоблоків АЕС, а також залишаються напрями наукових і прикладних досліджень, які були визначені для МНТЦ «Укриття».

Соціальне значення науково-технічної підтримки всіх робіт, пов'язаних із перетворенням об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему, яку надавали співробітники ІПБ АЕС, полягає в захисті людини та довкілля від потенційних ризиків через існування радіаційно небезпечного об'єкта «Укриття».

Із 2016 року ІПБ АЕС очолює чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф. Носовський Анатолій Володимирович, який має значний практичний досвід управлінської та наукової роботи на Чорнобильській АЕС у післяварійний період, брав

активну участь у ліквідації наслідків аварії у складі спеціалізованої організації «Управління будівництва УС-605» Мінсередмашу СРСР, працював над вирішенням проблем забезпечення радіаційного захисту під час будівництва об'єкта «Укриття» і підготовки до пуску енергоблоків Чорнобильської АЕС. Під його безпосереднім керівництвом здійснювалися виміри радіаційного стану в місцях проведення будівельних і відновлювальних робіт, розроблялись і впроваджувались організаційні й технічні заходи, спрямовані на забезпечення радіаційної безпеки.

Науково-технічна діяльність Інституту охоплює практично всі види робіт зі стабілізації будівельних конструкцій, створення систем безпеки та перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему. Постійно здійснюються поточний моніторинг об'єкта, виявлення та вивчення факторів небезпеки, аналіз ядерної та радіаційної безпеки. На підставі отриманої інформації Інститут розробляє науково обґрунтовані рекомендації щодо підвищення рівня безпеки об'єкта «Укриття».

Протягом свого функціонування ІПБ АЕС накопичив науковий потенціал для реалізації завдань, покладених на нього Національною академією наук України. Той колектив, що стояв біля джерел створення Інституту, і той, що працює сьогодні, визначив успіх наукової установи в цілому. Основою всіх досягнень ІПБ АЕС є наполеглива праця і творча активність працівників, які виконують складні наукові та практичні завдання, співпрацюючи з провідними національними та міжнародними науково-технічними організаціями.

Фахівці Інституту мають високий рівень професіоналізму у сферах безпечної експлуатації об'єктів з ядерними технологіями, ліквідації наслідків радіаційних аварій, зняття з експлуатації ядерних установок, поводження з відпрацьованим ядерним паливом і радіоактивними відходами, проведення робіт у радіаційно небезпечних умовах.

Встановлений у кадровій політиці Інституту пріоритет щодо правонаступності й послідовності передавання знань сприяє зростанню кількості висококваліфікованих спеціалістів та забезпечує якісне виконання наукових завдань. Накопичений досвід і знання, командний дух, прагнення до підвищення рівня ефективності діяльності та бачення шляхів розвитку наукового потенціалу є тим фундаментом, на якому ІПБ АЕС створює науково-технічну продукцію високого рівня.



Носовський А. В.



Патон Б. Є.

Значну роль у становленні та формуванні ІПБ АЕС як наукової організації відіграли керівники НАН України — академіки Б. Є. Патон, В. Г. Бар'яхтар, О. В. Кириленко, В. П. Кухар, А. Г. Наумовець, Б. С. Стогній, В. П. Шестопапов, А. К. Шидловський та інші.

Об'єднані знання, ексклюзивний досвід та практичні навички багатьох фахівців ІПБ АЕС становлять основу унікальних можливостей Інституту в цілому і є запорукою успіху в досягненні поставлених цілей. Для провадження своєї діяльності Інститут має всі потрібні ресурси: дослідницький майданчик у м. Чорнобиль, відділення атомної енергетики у м. Києві, висококваліфікований науковий персонал, лабораторно-дослідницьку базу, унікальний банк даних та зразки проб ПВМ об'єкта «Укриття», базу знань про стан ядерного палива, будівельних конструкцій, про радіаційні умови на об'єкті «Укриття» та прилеглих територіях, а також ліцензії та сертифіковану систему управління якістю.

Науково-технічний супровід діяльності з введення в експлуатацію НБК та експлуатації НБК значною мірою є продовженням робіт, що тривалий час виконувались для забезпечення безпеки об'єкта «Укриття». Закінчення будівництва НБК суттєво вплинуло на стан об'єкта «Укриття» і умови його експлуатації, зокрема:

- змінилися характер і величини навантаження на будівельні конструкції локалізуючої споруди об'єкта «Укриття»;

- змінилися умови функціонування важливих для безпеки систем (елементів) управління запроектною аварією об'єкта «Укриття»;

- змінився волого-температурний режим у приміщеннях об'єкта «Укриття», що значно впливатиме на стан його ядерної та радіаційної безпеки (утворення додаткової кількості радіоактивних аерозолів, зміна підкритичності окремих скупчень ПВМ тощо).

Це зумовлює необхідність вирішення низки нових науково-технічних проблем, пов'язаних як з поточною безпекою, так і з безпекою демонтажу його нестабільних конструкцій, а також з подальшим вилученням/переведенням в контрольований стан ПВМ.

---

## 5.1 Науково-технічний супровід на етапах введення в експлуатацію та експлуатації нового безпечного конфайнмента

Введення в експлуатацію та експлуатація унікального комплексу НБК потребує постійного науково-технічного супроводу для прийняття обґрунтованих технічних рішень і забезпечення безпеки на кожному етапі. Зважаючи на це, на засіданні науково-технічної ради Чорнобильської АЕС ще задовго до закінчення будівництва НБК було прийнято рішення про розробку програми науково-технічного супроводу на етапах введення в експлуатацію та експлуатації НБК (далі — Програма).

Метою і призначенням робіт з науково-технічного супроводу на етапах введення в експлуатацію та експлуатації НБК є розв'язання не регламентованих чинними нормативними та іншими документами питань, що пов'язані з введенням в експлуатацію НБК з мінімальним ризиком помилок та експлуатацією єдиного комплексу НБК за відсутності достатнього досвіду та прямих аналогів у вітчизняній і світовій практиці.

До початку розробки Програми провели комплексний аналіз вихідних даних: чинників, що впливають на стан ядерної та радіаційної безпеки об'єкта «Укриття» в умовах його експлуатації всередині НБК;

чинників, що впливають на стан будівельних конструкцій об'єкта «Укриття» після встановлення НБК у проектне положення;

проектних рішень щодо функціонування систем і компонентів НБК, важливих для безпеки, та взаємодії їх з наявними системами і компонентами об'єкта «Укриття»;

запланованої діяльності на етапах введення в експлуатацію та експлуатації НБК.

Після цього обґрунтували перелік робіт, що потребують науково-технічного супроводу. Запланована діяльність з науково-технічного супроводу охоплює такі етапи життєвого циклу НБК:

введення в експлуатацію;

експлуатація НБК до закінчення першочергового демонтажу/підсилення нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття»;

подальше перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему.

Заходи з науково-технічного супроводу на етапах введення в експлуатацію та експлуатації НБК реалізуються за двома напрямками: 1) забезпечення надійності будівельних конструкцій; 2) забезпечення радіаційної та ядерної безпеки [8].

**Складові діяльності із забезпечення надійності будівельних конструкцій:**

контроль стану будівельних конструкцій НБК за допомогою системи контролю будівельних конструкцій (СКБК) і системи сейсмічного контролю (ССК);

контроль стану будівельних конструкцій об'єкта «Укриття» за допомогою системи контролю стану будівельних конструкцій (СКСБК), що входить до складу інтегрованої автоматизованої системи контролю (ІАСК);



---

---

контроль стану будівельних конструкцій за допомогою геодезичних спостережень;  
розробка тривимірної моделі НБК для візуалізації показань СКСБК ІАСК та СКСБК НБК;

ведення бази даних про стан будівельних конструкцій.

**Складові діяльності із забезпечення радіаційної та ядерної безпеки:**

дослідження впливу зміни стану ПВМ у нових умовах експлуатації об'єкта «Укриття» на рівень ядерної безпеки;

дослідження впливу нових умов експлуатації об'єкта «Укриття» на рівень радіаційної безпеки;

систематичний моніторинг поведінки скупчень ПВМ.

*Напрями досліджень впливу зміни стану ПВМ на рівень ядерної безпеки:*

створення додаткової системи локального контролю підкритичності ядерно небезпечних скупчень;

створення та супровід єдиної бази даних системи контролю ядерної безпеки ІАСК та системи локального контролю підкритичності ядерно небезпечних скупчень;

розробка процедур ідентифікації підкритичних аномалій у показниках детекторів нейтронів та датчиків температури;

аналіз роботи штатних систем пригнічення параметрів критичності ядерно небезпечних скупчень; підготовка технічних пропозицій щодо пригнічення критичності введенням рідких або твердих поглиначів нейтронів;

контроль динаміки нейтронної активності і температури ПВМ у процесі зміни волого-температурного режиму.

*Напрями досліджень впливу нових умов експлуатації об'єкта «Укриття» на рівень радіаційної безпеки:*

вивчення просторових, кутових і енергетичних характеристик полів іонізуючого випромінювання, зокрема у процесі розкриття об'єкта «Укриття» після демонтажу нестабільних конструкцій; визначення основних джерел, які формують радіаційну обстановку всередині НБК, розробка рекомендацій з їх екранування або вилучення;

оцінка викидів радіоактивних аерозолів з об'єкта «Укриття» в простір під НБК (до початку і під час демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття»);

аналіз повітряних потоків і пов'язаних з цим змін радіаційної обстановки через перенесення пилу всередині об'єкта «Укриття»;

оцінка зміни радіонуклідного й елементного складу водних скупчень і донних відкладень у приміщеннях об'єкта «Укриття»;

моніторинг приземного шару повітря на промисловому майданчику НБК, побудова тривимірної моделі розповсюдження викидів з урахуванням аеродинамічної тіні та розробка методики контролю герметичності НБК;

обґрунтування мережі спостережних свердловин на майданчику НБК та проведення радіогідроекологічного моніторингу;



Засідання Президії НАН України 08.02.2017

вибір ефективних методів дезактивації демонтованих конструкцій і забруднених поверхонь.

*Систематичний моніторинг поведінки скупчень ПВМ:*

дослідження для оцінки стану палива у центральному залі та південному басейні витримки;

дослідження впливу зміни стану ПВМ на динаміку їх деградації;

дослідження радіоактивних аерозолів, зокрема радіонуклідного та дисперсного складу, поблизу скупчень ПВМ.

Науково-технічний супровід діяльності з подальшого перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему передбачає проведення досліджень, спрямованих на опрацювання наукових засад та концептуальних рішень щодо вирішення проблем об'єкта «Укриття» в довгостроковій перспективі, а саме:

комплексний аналіз потенційних стратегій перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему та обґрунтування кращого сценарію щодо вилучення/переведення в контрольований стан ПВМ і подальшого поводження з ними

---

---

(з урахуванням досвіду експлуатації, зокрема діяльності з демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття»);

аналіз вимог національних нормативно-правових актів і міжнародних норм, правил і стандартів та оцінка їх достатності для вирішення проблем перетворення об'єкта «Укриття»;

розробка пропозицій щодо розширення інфраструктури НБК для проведення діяльності з безпечного вилучення/переведення в контрольований стан ПВМ та подальшого поводження з ними;

поглиблене вивчення фізико-хімічних властивостей ПВМ з метою прогнозування процесу деградації їх та кількісної оцінки параметрів пилоутворення;

удосконалення методів паспортизації ПВМ, зокрема прямих методів вимірювання в них вмісту ядерних матеріалів;

розробка методів кондиціонування ПВМ для довготривалого зберігання з урахуванням вимог до майбутнього їх захоронення;

розробка технічних пропозицій щодо реалізації безлюдних технологій для використання в умовах об'єкта «Укриття».

Президія НАН України 08 лютого 2017 року розглянула і схвалила «Програму науково-технічного супроводу на етапах введення в експлуатацію та експлуатації НБК», а також зобов'язала ІПБ АЕС забезпечити організацію і координацію участі установ НАН України у виконанні цієї Програми на всіх етапах її реалізації.

## **5.2 Програма моніторингу паливовмісних матеріалів**

У Плані здійснення заходів на об'єкті «Укриття» (ПЗЗ ОУ), розробленому 1997 року при взаємодії Комісії Європейського Співтовариства, США, України та групи міжнародних експертів, підкреслено потребу вивчення питання моніторингу поведінки і контролю ПВМ на весь період перебування їх в об'єкті «Укриття».

Відповідно до ПЗЗ ОУ, виконано аналіз ПВМ за станом на 1997 рік, розроблено концептуальні рішення стосовно інструментального моніторингу стану ПВМ (телеспостереження, радіаційні виміри, спостереження за повітряними потоками і радіоактивними аерозолями об'єкта «Укриття», відбір і аналіз проб води) [139]. 2005 року розроблено документ «Стратегія поводження з ПВМ та радіоактивними відходами об'єкта «Укриття»», де зазначено, що повномасштабна характеристика ПВМ, яка передбачає відбір проб і створення «гарячих» камер, пов'язана з великими дозо- та трудовитратами і, згідно з принципами радіаційного захисту, є недоцільною. Тому пропонується розробити програму моніторингу поведінки паливовмісних матеріалів до вилучення і під час вилучення їх. Враховуючи, що вилучення ПВМ — досить тривалий період, програма моніторингу стану ПВМ мала б дати змогу контролювати стан ПВМ і забезпечити можливість вживати заходів щодо обмеження несприятливого розвитку подій.

---

---

Згідно з цим документом система моніторингу поведінки ПВМ, разом із СБЯБ ІАСК, мала забезпечити отримання даних для оцінки стану ПВМ з метою визначення необхідності реалізації превентивних заходів, спрямованих на зниження небезпеки розповсюдження, а також для достовірного прогнозування довгострокової поведінки ПВМ з метою розробки та прийняття остаточної стратегії вилучення ПВМ.

Із установленням НБК над об'єктом «Укриття» виникли зміни в процесах, що визначають стан та поведінку ПВМ. По-перше, це унеможливлення надходження атмосферних опадів в об'єкт «Укриття», що тягне за собою пересихання скупчень радіоактивної води, оголення донних відкладень з утворенням додаткових джерел радіоактивного пилу. По-друге, це втрата вологи ядерно небезпечними скупченнями ПВМ, що несе потенційну загрозу виникнення в них зворотної критичності та ядерного інциденту.

На сьогодні дані про стан ПВМ (хімічні, радіохімічні, фізико-механічні властивості, деградація) та стійкість їх до руйнування недостатньо вивчені, що не дає змоги точно прогнозувати поведінку таких матеріалів у часі.

Тому концепція розробленої 2018 року ІПБ АЕС «Програми моніторингу ПВМ об'єкта «Укриття»» [78] полягла в розробці нових підходів і методів оцінки ядерної та радіаційної безпеки поводження з ПВМ, радіоактивною водою і радіоактивним пилом на всіх етапах експлуатації НБК (рис. 5.1). Одним з головних завдань програми стало отримання максимуму інформації для прогнозних оцінок ядерної та радіаційної безпеки без додаткового дозового навантаження на персонал (фото, відеозйомка скупчень ПВМ, відбір зразків).

Оцінка поведінки паливовмісних матеріалів відповідно до Програми моніторингу ПВМ здійснюється за опосередкованою інформацією щодо їх змін з часом, а саме:

- змін радіаційної обстановки — ПЕД  $\gamma$ -випромінювання та аерозольної активності;

- змін фізико-хімічних та механічних характеристик на зразках ПВМ у лабораторних умовах;

- змін у поведінці паливного пилу та скупчень радіоактивної води;

- змін температури, ЩПН та потужності дози  $\gamma$ -випромінювання в потенційно ядерно небезпечних скупченнях ПВМ за даними систем контролю.

Актуальність моніторингу ПВМ зумовлено потребою в довгостроковому прогнозуванні поведінки ПВМ для розробки остаточної стратегії вилучення ПВМ та істотними змінами умов всередині об'єкта «Укриття», які з часом можуть значно вплинути на стан безпеки. Водночас одержана інформація дасть змогу вжити коригувальних дій щодо підтримки ПВМ у підкритичному стані, зниження пилоутворення, контролю стану ПВМ. Крім того, база даних основних параметрів ПВМ, створення якої передбачене в Програмі моніторингу ПВМ, знадобиться на етапах підготовки до вилучення ПВМ та їх вилучення з об'єкта «Укриття».



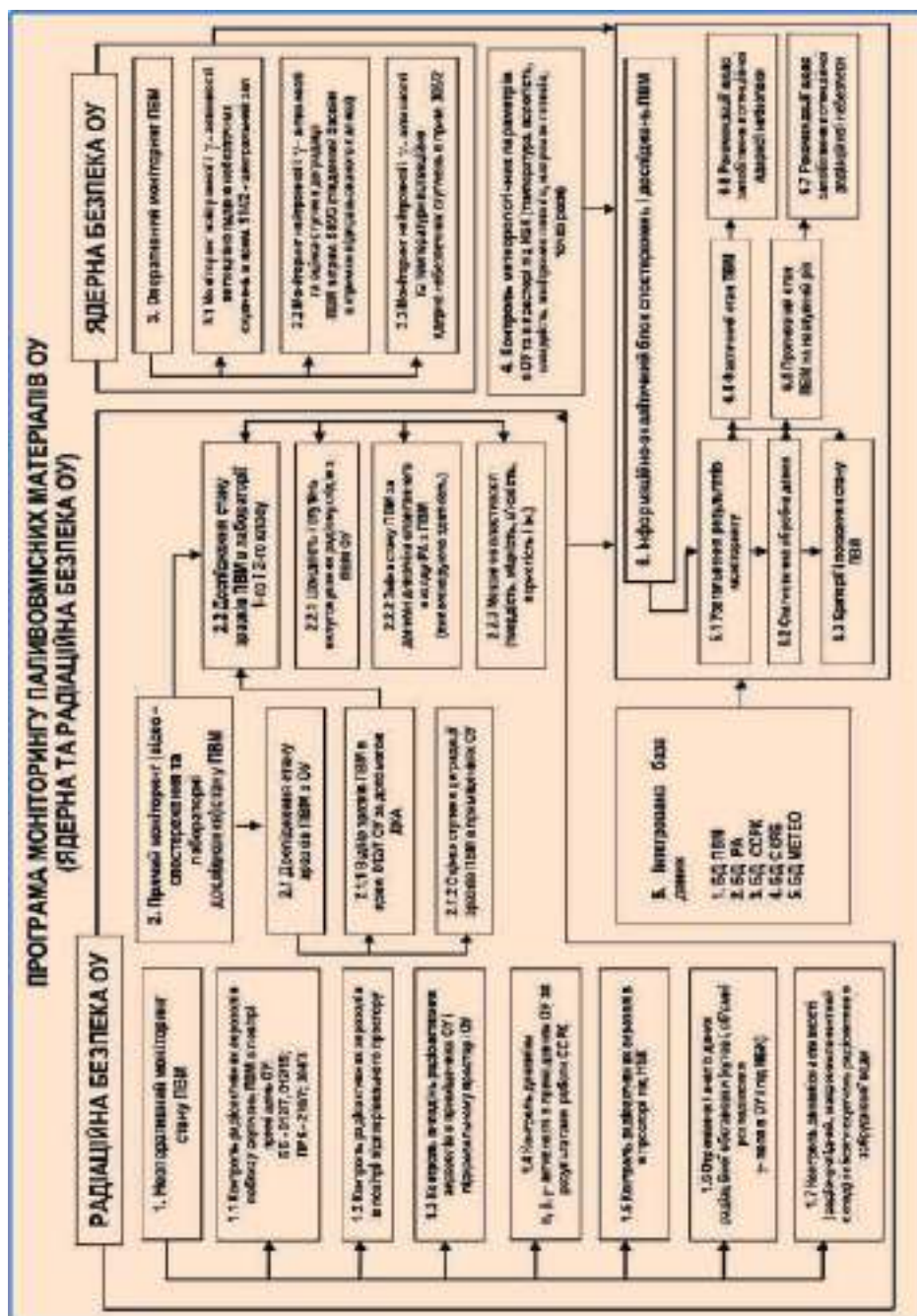


Рис. 5.1 — Програма моніторингу паливовмісних матеріалів об'єкта «Укриття»

---

---

Програма моніторингу (див. рис. 5.1) складається з двох основних блоків: радіаційна і ядерна безпека ПВМ, оскільки в процесі реалізації Програми моніторингу ПВМ кінцевою метою є отримання інформації для подальшої розробки превентивних заходів щодо запобігання радіаційній та ядерній небезпеці. Програма містить обґрунтування об'ємів та періодичності контролю, місцезнаходження об'єктів моніторингу, розташування точок контролю і методів моніторингу. Об'єктами моніторингу для отримання інформації є радіоактивні аерозолі, їх випадіння, радіоактивно забруднена вода, поля  $\gamma$ -випромінювання, а також нейтронні та температурні поля в об'єкті «Укриття», скупчення ПВМ, зразки ПВМ, мікроклімат у НБК.

У програмі викладені вимоги: до методів моніторингу та його інформативності про стан ПВМ; об'єктів контролю; виконання польових і лабораторних робіт (методів, періодичності відбору проб та вимірів, місць проведення робіт та критеріїв оцінювання рівнів деградації ПВМ); польового та лабораторного обладнання; організаційних і технічних заходів щодо забезпечення якості робіт у процесі моніторингу ПВМ, які містять перелік і технологічну послідовність робіт; нормативно-технічної документації, а також загальні вимоги щодо безпеки, захисту персоналу і довкілля.

### 5.2.1 Радіаційна безпека

*Неоперативний (непрямий) моніторинг стану ПВМ* побудований з огляду на те, що носіями інформації про стан ПВМ можуть бути:

аерозолі в приміщеннях об'єкта «Укриття» та НБК (динаміка активності аерозолів у повітрі, дисперсний та радіонуклідний склад радіоактивних аерозолів та їх випадіння —  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{155}\text{Eu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  — на навколишні поверхні;

аналіз динаміки  $\alpha$ -,  $\beta$ -активності аерозолів у приміщеннях об'єкта «Укриття» за результатами роботи стаціонарної СРК;

радіоактивна вода в приміщеннях об'єкта «Укриття» (радionуклідний, макрокомпонентний та фазовий склад);

об'ємні та кутові розподілення  $\gamma$ -випромінювання під НБК, що є носіями інформації про переміщення скупчень ПВМ за аварійних ситуацій (зміна локації ПВМ у разі обвалення будівельних конструкцій) або під час природних катаклізмів (землетрус).

До неоперативного моніторингу стану ПВМ належать:

контроль об'ємної радіоактивності та дисперсного складу аерозолів поблизу відкритих скупчень ПВМ у приміщеннях об'єкта «Укриття» 012/7, 012/15; 210/7 та 304/3;

контроль РА (радionуклідний та дисперсний склад) у підпокрівельному просторі об'єкта «Укриття»;

контроль РА на верхніх висотних позначках об'єкта «Укриття» в просторі під НБК (викиди через нещільності легкої покрівлі);

контроль РА у приземному шарі в просторі під НБК.

Основними критеріями деградації ПБМ є підвищення об'ємної активності основних радіонуклідів та співвідношення активностей радіонуклідів у паливній матриці скупчення ПБМ певного приміщення об'єкта «Укриття» до аналогічного співвідношення радіонуклідів в пробах аерозолію чи випадіннях, відібраних у цьому ж приміщенні. Тобто якщо через певний час фіксуватиметься збільшення активності аерозолів, то при схожому до ПБМ співвідношенні радіонуклідів у них це означатиме, що інтенсифікувались процеси деградації. Додатковим критерієм служить дисперсність РА з цього приміщення.

Контроль  $\alpha$ -,  $\beta$ -активності аерозолів та  $\gamma$ -випромінювання в приміщеннях (другий вид робіт неоперативного моніторингу стану ПБМ) виконується стаціонарною СРК в складі інтегрованої автоматизованої системи (табл. 5.1). Результати контролю стаціонарної СРК є додатковою інформацією для комплексної та інтегральної оцінки стану ПБМ в об'єкті «Укриття».

**Таблиця 5.1 — Точки контролю об'ємної  $\alpha$ - та  $\beta$ -активності, інформація з яких використовуватиметься для інтегральної оцінки стану ПБМ в об'єкті «Укриття»**

Датчик ПЕД	Приміщення, блок, позначка	Вісь	Ряд	Висота установки над рівнем підлоги, м
SRMS-S-AIR-001	006/2, Б, 0.000	50 <sub>+2500</sub>	Д <sub>+500</sub>	1,5
SRMS-S-AIR-002	Г-109/3, Г, +1.000	55 <sub>+1000</sub>	В <sub>-4000</sub>	1,4
SRMS-S-AIR-003	206/2, Б, +6.000	50	Д <sub>-1000</sub>	1,3
SRMS-S-AIR-004	Г-274, Г, +5.800	55 <sub>-2500</sub>	В <sub>+1500</sub>	1,6
SRMS-S-AIR-005	Г-347, Г, +10.000	55 <sub>+3000</sub>	В'	1,6
SRMS-S-AIR-006	Г-350, Г, +10.000	66 <sub>+800</sub>	Б	1,6
SRMS-S-AIR-007	3.30, Г, +10.000	40 <sub>+2000</sub>	В <sub>-5000</sub>	1,6
SRMS-S-AIR-008	Г-557, Г, +16.400	54 <sub>-1000</sub>	В	1,6
SRMS-S-AIR-009	Г-526/2, Г, +19.500	54 <sub>+3000</sub>	В'	1,6
SRMS-S-AIR-010	615/2, Б, +24.000	50	Д <sub>-2000</sub>	0,5
SRMS-S-AIR-011	Г-632, Г, +24.270	53 <sub>+3000</sub>	В'	1,2

Стаціонарна СРК контролює (рис. 5.2):

потужність експозиційної дози  $\gamma$ -випромінювання в повітрі приміщень постійного і періодичного перебування персоналу;

об'ємну  $\alpha$ -активність РА в діапазоні  $2 \cdot 10^{-2} — 10^5$  Бк/м<sup>3</sup> (<sup>238</sup>, <sup>239</sup>, <sup>240</sup>Pu, <sup>241</sup>Am);

об'ємну  $\beta$ -активність РА в діапазоні  $2 \cdot 10^{-1} — 10^7$  Бк/м<sup>3</sup> (<sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr + <sup>90</sup>Y).

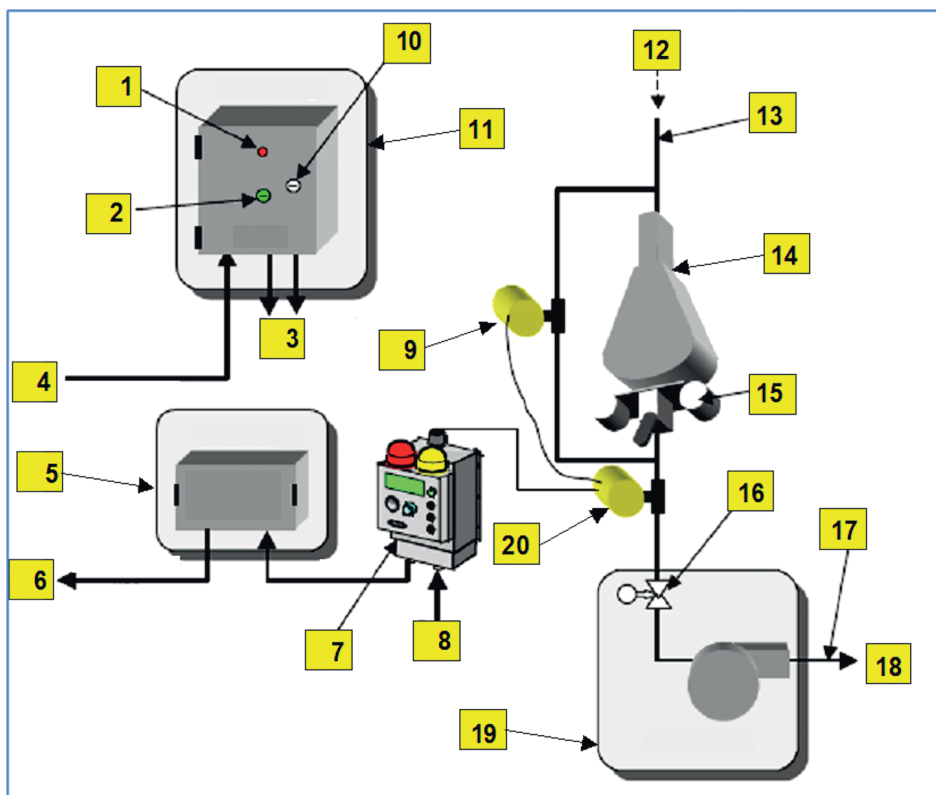


Рис. 5.2 — Модуль контролю радіоактивних аерозолів стаціонарної СРК ІАСК [139]:

1 — індикатор живлення; 2 — кнопка вкл./викл. насоса; 3 — живлення насоса; 4, 8 — лінія енергопостачання; 5 — розподільча коробка; 6 — лінія передачі даних до пристрою зв'язку з об'єктом; 7 — локальний процесор; 9 — мембранний перемикач; 10 — замок; 11 — електричний блок; 12 — вхідний отвір; 13 — труба OD; 14 — установка для виміру об'ємної активності РА; 15 — касета фільтра і перемикач; 16 — регулювальний клапан; 17 — труба 12-мм OD; 18 — вихідний отвір; 19 — насос; 20 — витратомір

Оцінку стану ПВМ проводять на основі статистичного аналізу даних об'ємної  $\alpha$ - та  $\beta$ -активності. За отриманими результатами визначають апроксимуючу закономірність, відповідно до якої дають поточні та прогностичні оцінки характеру поведінки ПВМ.

Критерієм деградації ПВМ є вихід  $\alpha$ -,  $\beta$ -активності аерозолів у приміщеннях об'єкта «Укриття» за межі довірчого інтервалу, який розраховують з рівнем довіри 0,95 за даними роботи стаціонарної СРК та співвідношеннями  $\alpha$ -,  $\beta$ -активності.



Неоперативний моніторинг стану ПБМ побудований з урахуванням того, що інформація про радіонуклідний та фазовий склад скупчень РВ, які містяться неподалік від скупчень ПБМ в об'єкті «Укриття» (табл. 5.2), може бути носієм інформації про деградацію ПБМ об'єкта «Укриття».

**Таблиця 5.2 — Рекомендовані точки (місця) відбору проб радіоактивної води**

Номер точки відбору	Номер приміщення	Будівельні координати			Примітки
		позначка, м	ряд	вісь	
6	012/16	+2,20	Ж	48–49	
7	009/4	0,00	Ж	49–50	
18	017/2	0,00	Г–Д	43–44	
20	01/3	+1,25	Т	47–48	Труба з ПРК
21	012/13	+2,20	Р	45–46	
30	001/3, САОР	–2,60	У–У1	49–50	
31	012/6	–0,95	С–Т	45–46	Приямок
32	012/7	–0,65	Е–Ж	47–48	
35	012/8	0,00	Ж <sub>–1500</sub>	49–500	Колектор на позн. +9,00

До спорудження НБК, внаслідок надходження атмосферної вологи з верхніх позначок об'єкта «Укриття» до нижніх та вилугування радіонуклідів з ПБМ, вода несла інформацію про стан ПБМ. В умовах НБК за відсутності надходження атмосферної вологи в об'єкт «Укриття» процеси вилугування радіонуклідів з ПБМ суттєво уповільнились, проте найближчі чотири-п'ять років вони можуть ще бути вагомими через утворення конденсаційної вологи. Це дасть змогу використовувати характеристики забруднення РВ для оцінки стану ПБМ в об'єкті «Укриття».

Відбір проб для оцінки активності та радіонуклідного складу радіоактивної води рекомендується проводити в приміщеннях об'єкта «Укриття» з періодичністю раз на місяць. Об'єми води контролюються паралельно з відбором проб.

Критеріями деградації ПБМ є зміна співвідношення концентрацій радіонуклідів  $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{90}\text{Sr}/^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$  та збільшення концентрації урану в пробах радіоактивної води.

Критерії та показники оцінювання наведено в табл. 5.3 і 5.4.

ПЕД  $\gamma$ -випромінювання всередині НБК визначається, передусім, скупченнями ПБМ, які містяться в об'єкті «Укриття». Об'ємна картина дислокації основних мас ПБМ і моніторинг об'ємних та кутових розподілів ПЕД  $\gamma$ -поля дадуть змогу

отримати дані про можливі переміщення великих мас паливовмісних матеріалів в об'єкті через обрушування несучих конструкцій чи землетрус.

**Таблиця 5.3 — Критерії оцінки стану деградації паливовмісних матеріалів**

Співвідношення концентрацій радіонуклідів	Критерій оцінки	Показник критерію оцінки (01.07.2018)
$^{241}\text{Am}/^{239} + ^{240}\text{Pu}$	$(^{241}\text{Am}/^{239} + ^{240}\text{Pu})_{\text{вода}} > (^{241}\text{Am}/^{239} + ^{240}\text{Pu})_{\text{ПВМ}}$	1,9
$^{90}\text{Sr}/^{239} + ^{240}\text{Pu}$	$(^{90}\text{Sr}/^{239} + ^{240}\text{Pu})_{\text{вода}} > (^{90}\text{Sr}/^{239} + ^{240}\text{Pu})_{\text{ПВМ}}$	42
$^{238}\text{Pu}/^{239} + ^{240}\text{Pu}$	$(^{238}\text{Pu}/^{239} + ^{240}\text{Pu})_{\text{вода}} > (^{238}\text{Pu}/^{239} + ^{240}\text{Pu})_{\text{ПВМ}}$	0,457

**Таблиця 5.4 — Критерії оцінки стану деструкції паливовмісних матеріалів за концентрацією урану в радіоактивній воді**

Номер точки відбору	Концентрація урану, мг/дм <sup>3</sup> (середнє за 2017 р.)	Показник критерію оцінки на 01.07.2018 (уран, мг/дм <sup>3</sup> )	Номер точки відбору	Концентрація урану, мг/дм <sup>3</sup> (середнє за 2017 р.)	Показник критерію оцінки на 01.07.2018 (уран, мг/дм <sup>3</sup> )
6	11 ± 2	15	30	7,4 ± 0,9	7,6
7	13 ± 2	30	31	32 ± 3	34
18	0,59 ± 0,18	3,8	32	56 ± 15	104
20	13 ± 3	18	35	12 ± 8	8,8
21	2,1 ± 0,3	3,3			

Моніторинг кутового розподілу і енергетичних ( $E_\gamma$ ) характеристик ПЕД  $\gamma$ -випромінювання проводять на всіх етапах перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему (демонтаж нестабільних конструкцій, вилучення ПВМ і поводження з ними).

Задачі вимірів: визначення напрямків на інтенсивні джерела  $\gamma$ -випромінювання; визначення  $\gamma$ -спектра випромінювання; контроль змін геометрії та розташування джерел випромінювання.

Зважаючи на високі радіаційні поля в місцях контролю, безпосередню близькість від скупчень ПВМ на зовнішніх конструкціях об'єкта «Укриття» і на території майданчиків під НБК, апаратура для дослідження кутового розподілу і  $E_\gamma$  має бути автономною (без присутності людини і без використання зовнішньої електромережі), легко переноситися та дезактивуватися, мати засіб орієнтації в просторі.

---

---

*Оперативний (прямий, безпосередній) моніторинг ПБМ* проводять з метою оцінки ступеня деградації ПБМ на основі візуального спостереження та лабораторних досліджень проб ПБМ і здійснюють за трьома головними напрямками раз на рік:

візуальний контроль руйнування за допомогою відеоспостереження в місцях локалізації ПБМ;

лабораторні дослідження фізико-механічних властивостей зразків ПБМ;

дослідження радіохімічних властивостей зразків ПБМ.

Ступінь деградації ПБМ у приміщеннях об'єкта «Укриття» оцінюють за такою схемою: візуальний контроль руйнування за допомогою приладів відеоспостереження на місцях локалізації ПБМ (двічі на рік) → відбір зразків ПБМ в об'єкті «Укриття» за допомогою дистанційно керованого агрегата (ДКА) (зразки в приміщеннях відбирають у кількості, яка не суперечить вимогам безпеки під час проведення робіт в об'єкті «Укриття», за окремою програмою безпечного проведення робіт) → контроль пилогенеруючої здатності: відбір проб аерозолів «здувом» з поверхні зразка на імпактор (у лабораторних умовах) та визначення в пробах дисперсного та радіонуклідного складу аерозолів (двічі на рік в лабораторних умовах) → контроль ступеня руйнування за кількістю дрібнозернистої фракції (визначення кількості фракцій за допомогою радіографії); відбір проб на плівкову клейку основу на місці залягання ПБМ з використанням дистанційних технологій (телескопічних штанг, ДКА) та в кількості, яка не суперечить вимогам безпеки під час проведення робіт в об'єкті «Укриття».

Лабораторні дослідження фізико-хімічних властивостей в зразках ПБМ, зокрема радіонуклідного складу зразків ПБМ з приміщень, проводять у радіохімічній лабораторії: підготовка проб для аналізів → радіохімічний аналіз →  $\alpha$ -,  $\gamma$ -спектрометричний аналіз → визначення активності радіонуклідів  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{155}\text{Eu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239} + ^{240}\text{Pu}$  за результатами аналізів.

Результати лабораторних випробувань заносять в базу даних для використання в комплексному аналізі даних моніторингу ПБМ.

Швидкість та ступінь вилугування радіонуклідів з ПБМ дистильованою та блочною водою визначають за ступенем розчинності  $i$ -го радіонукліда як відношення активності ( $A_i$ ) в розчині до активності цього радіонукліда в початковому зразку ПБМ ( $A_{i0}$ ).

Основні етапи з'ясування ступеня вилугування радіонуклідів з ЛПБМ: 1) підготовка проб,  $\gamma$ -спектрометричні вимірювання активності  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}, ^{155}\text{Eu}$  і  $^{241}\text{Am}$  у вихідних зразках ПБМ; 2) радіохімічне визначення вмісту  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239} + ^{240}\text{Pu}$  і  $^{241}\text{Am}$  у вилугуваному розчині. У всіх розчинах і твердих залишках після експозиції встановлюють вміст радіонуклідів  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239} + ^{240}\text{Pu}$  і  $^{241}\text{Am}$ .

Швидкість і ступінь вилугування радіонуклідів з ПБМ залежить, насамперед, від площі питомої поверхні зразків ПБМ і швидкості дифузії радіонуклідів з глибини на поверхню контакту. Критерії оцінки стану деградації ПБМ за швидкістю вилугування наведено в табл. 5.5.

**Таблиця 5.5 — Критерії оцінки стану деструкції ПВМ  
за швидкістю вилуговування радіонуклідів дистильованою водою**

ПВМ	Критерій оцінки	Значення критерію оцінки
Поліхромні	Константи вилуговування $^{137}\text{Cs}$ з ЛПВМ, доба <sup>-1</sup>	$1,7 \cdot 10^{-6}$
Коричневі	Константи вилуговування $^{137}\text{Cs}$ з ЛПВМ, доба <sup>-1</sup>	$5,6 \cdot 10^{-6}$
Чорні	Константи вилуговування $^{137}\text{Cs}$ з ЛПВМ, доба <sup>-1</sup>	$7,8 \cdot 10^{-6}$

Механічні властивості зразків ПВМ досліджують в лабораторії за такими показниками: міцність, мікротвердість, в'язкість, пористість, характеристики складових порового простору, вміст кристалічних фаз у скломатриці, швидкість утворення зародків та швидкість зростання кристалічних зародків у склофазі, розподіл радіонуклідів на мікрорівні в усіх фазах, рухливість іонів (зокрема радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , урану, плутонію, америцію).

Вивчені механічні характеристики ПВМ дадуть змогу глибше зрозуміти фізико-хімічні процеси, що відбуваються у ПВМ, і завдяки цьому розвинути модель мікроструктури ПВМ та надати як короткострокові, так і довгострокові реалістичніші прогнози трансформації мікроструктури та основних фізико-хімічних властивостей.

### 5.2.2 Ядерна безпека

Основним принципом, який визначає діяльність із забезпечення ядерної безпеки на об'єкті «Укриття», є унеможливлення СЛР за наявних умов і за будь-яких передбачуваних змін їх [51]. СЛР завжди розглядають як гіпотетичну подію, що є результатом таких умов настання, які на рівні доступних знань і наявного досвіду передбачити неможливо.

Якщо СЛР неможливо відкинути як гіпотетичну подію, вона залишається потенційно ядерно небезпечним чинником. Для таких об'єктів, як «Укриття», потрібні постійний моніторинг нейтронної активності та встановлення процедур виявлення й інтерпретації аномалій в динаміці ЩПН, пов'язаних з відхиленнями від безпечних та допустимих значень параметрів критичності [27].

На підставі експериментальних і розрахункових оцінок проведено класифікацію приміщень за ступенем ядерної небезпеки скупчень ПВМ, що містяться в них.

Потенційно ядерно небезпечними визнані підреакторне приміщення 305/2, центральний зал, південний басейн витримки, в яких допускалася наявність композицій ПВМ, де виникнення СЛР принципово можливе.

Динаміку нейтронної та  $\gamma$ -активності потенційно ядерно небезпечних скупчень ПВМ в об'єкті «Укриття» контролюють за даними СКЯБ щохвилино та фіксують



дисперсію їхнього середнього. Саме ці результати вимірювань системою СКЯБ і взяті для комплексної оцінки та прогнозу стану ядерної безпеки ПВМ. Одержана інформація дає змогу скласти репрезентативні статистичні вибірки моніторингових досліджень ПЕД і ЩПН та проводити математичний статистичний аналіз часових рядів спостережень, кореляційний та регресійний аналізи та прогнозні оцінки.

Для підвищення інформативності моніторингом охоплено дані про температуру в потенційно ядерно небезпечних скупченнях ПВМ від експертно-дослідницької системи, розробленої та впровадженої на Чорнобильській АЕС Інститутом проблем безпеки атомних електростанцій. Ця система має 11 вимірювальних каналів температури і додатково чотири канали ЩПН.

Метеорологічні параметри контролюють у режимі моніторингу температури, вологості, швидкості та напрямку повітряних потоків автономними метеостанціями PCE FWS та реєстраторами температури і вологості протягом року з інтервалом три години (рис. 5.3). Завдання контролю — отримати інформацію про зміни мікроклімату в просторі НБК та оцінити його вплив на ядерну і радіаційну безпеку, стан ПВМ, розробити та впровадити коригувальні заходи щодо роботи систем вентиляції.

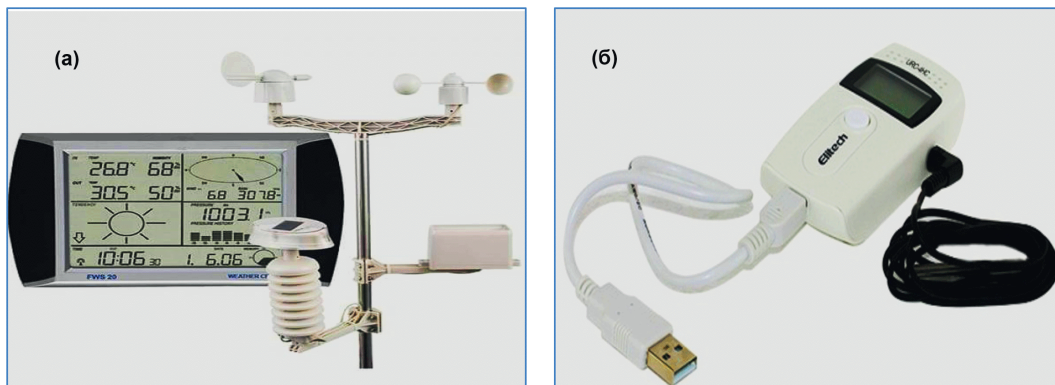


Рис. 5.3 — Апаратура контролю метеорологічних параметрів:  
а — автономна метеостанція PCE FWS; б — реєстратор температури  
і вологості Elitech RC-4HA/C

Інтегровану базу даних формують за результатами всіх видів моніторингу, на підставі яких надалі виконують систематичний аналіз та оцінку стану ПВМ. Параметри, які визначають поточний стан та прогнозні оцінки щодо поведінки ПВМ на майбутнє, обґрунтовують за допомогою статистичної обробки результатів, отриманих по всіх перерахованих вище напрямках досліджень.

---

## **Розділ 6. ПОДАЛЬШЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ» НА ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНУ СИСТЕМУ**

Побудова НБК суттєво знизила ризик можливого радіоактивного забруднення території через обвалення нестійких будівельних конструкцій об'єкта «Укриття». Але це тільки проміжний етап на шляху до створення екологічно безпечної системи, щоб досягти кінцевої мети — перевести у контрольований стан паливовмісні матеріали.

Найближчим часом треба виконати демонтаж будівельних конструкцій об'єкта «Укриття», термін експлуатації яких закінчується 2023 року, а далі розпочати роботи з відкладеного демонтажу інших будівельних конструкцій.

Паливовмісні матеріали, які утворилися внаслідок аварії, є головним джерелом небезпеки об'єкта «Укриття». За станом і складом вони належать до довгоіснуючих РАВ, а для деяких з них дотепер нема підтвердження того, що вони є ядерно безпечними. Потенційна небезпека ПВМ згодом може зростати внаслідок спонтанного руйнування їх поверхні з утворенням високоактивного пилу. Отже, надзвичайно актуальною є розробка технологічних рішень щодо вилучення ПВМ з використанням систем НБК та обґрунтування безпеки в процесі їх реалізації.

Паливовмісні матеріали потрібно перевести у контрольований стан та поставити на підконтрольне тимчасове зберігання з подальшим захороненням, оскільки, по-перше, цього вимагає закон України «Про загальні засади подальшої експлуатації і зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблока цієї АЕС на екологічно безпечну систему»; по-друге, всі ядерні матеріали об'єкта «Укриття» мають стояти на обліку під постійним контролем МАГАТЕ. До того ж існує позитивний досвід вилучення ПВМ на АЕС «Три-Майл-Айленд» у США, а в Японії на АЕС «Фукусіма» прийнято стратегію вилучення ядерних матеріалів та проводяться дослідницькі роботи в цьому напрямі.

Перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему та зняття його з експлуатації стане можливим лише тоді, коли ПВМ будуть переведені у ядерно безпечний стан і поставлені на контрольоване зберігання або передані на захоронення. Для того щоб приступити до вилучення ПВМ, потрібно вжити таких заходів:

- розробити основні технологічні рішення та проекти виконання робіт щодо вилучення та кондиціонування ПВМ;

- розробити дистанційно кероване робототехнічне обладнання;

---

---

створити інфраструктуру для поводження з ПВМ та РАВ, зокрема технології та системи сортування, моніторингу, характеристики, дезактивації, підготувати майданчик для тимчасового зберігання ПВМ та РАВ, парк контейнерів для ПВМ тощо.

Залишається не остаточно розв'язаною і проблема ядерної безпеки деяких скупчень ядерних матеріалів об'єкта «Укриття»; через нестачу наявних у розпорядженні вчених знань про них є багато непорозумінь, різних думок та критики. Потрібні додаткові дослідження, результати яких можуть лягти в основу обґрунтування ядерної безпеки та переконати суспільство в неможливості виникнення ядерної аварії, а також слід забезпечити постійний моніторинг основних скупчень ПВМ.

Вилучені з об'єкта «Укриття» ПВМ є довгоіснуючими відходами і підлягають захороненню тільки у сховищах, розташованих у стабільних геологічних формаціях. Оскільки таких сховищ в Україні не існує і створення їх можливе тільки в дуже віддаленій перспективі, потрібно ухвалити рішення про тимчасове довгострокове зберігання ПВМ, тобто про організацію проміжного сховища ПВМ.

## **6.1 Аналіз національних нормативно-правових актів та оцінка їх достатності**

Практична діяльність з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему провадиться відповідно до вимог Закону України «Про загальні засади подальшої експлуатації і зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблока цієї АЕС на екологічно безпечну систему» [11], Закону України «Про Загальнодержавну програму зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення об'єкта “Укриття” на екологічно безпечну систему» [141] та «Стратегії перетворення об'єкта “Укриття”» [142].

Перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему досягається реалізацією трьох основних етапів [142]:

*етап 1* — стабілізація стану об'єкта «Укриття», підвищення експлуатаційної надійності та довговічності конструкцій і систем, що забезпечують його стабілізацію та контроль показників безпеки;

*етап 2* — створення додаткових захисних бар'єрів (насамперед конфайнмента), що забезпечують потрібні умови для демонтажу нестабільних будівельних конструкцій та технічної діяльності на етапі 3, безпеку персоналу, населення та довкілля, а також виконання підготовчих інженерно-технічних робіт, спрямованих на розроблення технологій вилучення ПВМ на етапі 3 і створення інфраструктури для поводження з РАВ об'єкта «Укриття»;

*етап 3* — вилучення з об'єкта «Укриття» ПВМ та інших довгоіснуючих РАВ, кондиціонування їх з подальшим зберіганням і захороненням у сховищах РАВ відповідно до чинних стандартів, зняття з експлуатації об'єкта «Укриття».

---

---

Перший і другий етапи успішно виконано. Наприкінці листопада 2016 року закінчено основні роботи з монтажу та переміщення у проектне положення арки, а в липні 2020 року отримано окремий дозвіл на дослідно-промислову експлуатацію першого пускового комплексу НБК.

Після введення в експлуатацію НБК передбачається демонтаж нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття». Подальші заходи з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему мають спрямовуватись на вилучення/переведення в контрольований стан ПВМ та поводження з РАВ. Подібна діяльність на об'єкті, що зазнав запроектої аварії та не має аналогів у світовій практиці, є унікальною й потребує відповідного нормативно-правового забезпечення.

За Законом України «Про загальні засади подальшої експлуатації і зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблока цієї АЕС на екологічно безпечну систему» [11], однією з цілей перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему є *вилучення з нього матеріалів, які містять ядерне паливо, та радіоактивних відходів*. До початку вилучення з об'єкта «Укриття» матеріалів, які містять ядерне паливо, та РАВ належить перевести їх у контрольований стан.

У цьому ж Законі наведено визначення, що «конфайнмент — захисна споруда, що включає в себе комплекс технологічного обладнання для вилучення із зруйнованого четвертого енергоблока Чорнобильської АЕС матеріалів, які містять ядерне паливо, поводження з РАВ та інші системи, призначена для здійснення діяльності з перетворення цього енергоблока на екологічно безпечну систему та забезпечення безпеки персоналу, населення і довкілля».<sup>1</sup>

Згідно із Законом України «Про Загальнодержавну програму зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему» [141] передбачено *вилучення з об'єкта «Укриття» паливовмісних матеріалів, високоактивних та довгоіснуючих радіоактивних відходів, переведення їх у безпечний стан, проміжне контрольоване зберігання та захоронення в глибинних сховищах (стабільних геологічних формаціях) у разі, якщо до початку їх вилучення (орієнтовно через 30—50 років) не запропоновано альтернативного шляху убезпечення зберігання матеріалів у об'єкті «Укриття»*.

Завдання щодо перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему має розв'язуватися послідовним розробленням та реалізацією певних заходів, зокрема:

підготовкою і затвердженням нормативної та проектної документації з перетворення об'єкта на екологічно безпечну систему;

створенням додаткових захисних бар'єрів (передусім конфайнмента), що забезпечують умови для виконання технічних робіт на етапі перетворення об'єкта на екологічно безпечну систему, а також безпеку персоналу, населення та довкілля;

---

<sup>1</sup> Курсив автора



---

---

розробленням технологій вилучення ПВМ;  
створенням сховищ для захоронення (зокрема в геологічних формаціях) ПВМ та довгоіснуючих РАВ;

вилученням з об'єкта (або переведення в контрольований стан) ПВМ та довгоіснуючих РАВ, їх кондиціонуванням з подальшим зберіганням і захороненням у відповідних сховищах;

демонтажем конструкцій об'єкта та елементів конфайнмента.

У «Стратегії перетворення об'єкта “Укриття”» [142] наголошується: для досягнення повного контролю над джерелами ядерної та радіаційної небезпеки *необхідне вилучення ПВМ* та їх зберігання в заздалегідь створених контрольованих умовах, які забезпечуються багатобар'єрним захистом, що має бути обґрунтовано відповідно до вимог чинного законодавства.

Отже, у трьох основоположних документах, які визначають головний напрямок діяльності щодо перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему, зафіксовано *необхідність вилучення ПВМ*. При цьому згідно із «Стратегією перетворення об'єкта “Укриття”» [142] до ПВМ належать пошкоджене внаслідок запроектованої аварії ядерне паливо колишнього четвертого енергоблока Чорнобильської АЕС незалежно від його фізико-хімічного стану, тепловидільні збірки із басейну витримки, а також будь-які матеріали (фрагменти активної зони, суміші, розплави, розчини, хімічні сполуки, пил тощо), у складі яких міститься ядерне паливо в помітній кількості (тобто його концентрація 1 % і більше).

А тепер зупинимось на деяких положеннях документів [11, 141, 142].

У документі [11] сформульована умова, щоб матеріали, які містять ядерне паливо, та РАВ з об'єкта «Укриття» були переведені в контрольований стан до початку вилучення. Тобто переведення ПВМ у контрольований стан є передумовою, а не альтернативою діяльності з вилучення ПВМ.

У документі [141] сказано, що завданням перетворення об'єкта «Укриття» є вилучення з нього (або переведення в контрольований стан) ПВМ та довгоіснуючих РАВ, кондиціонування їх з подальшим зберіганням і захороненням у відповідних сховищах. У такому разі переведення ПВМ у контрольований стан сприймається як альтернатива його вилученню.

У документі [142] наведено визначення терміну «контрольований стан ПВМ»: це стан, в якому забезпечуються встановлена нормативними документами підкритичність ПВМ, а також можливість підтримки показників безпеки ПВМ на встановленому рівні внаслідок кондиціонування або створення додаткових інженерних бар'єрів. Що стосується кондиціонування ПВМ, то за визначенням терміну «кондиціонування радіоактивних відходів», наведеним у Законі України «Про поводження з радіоактивними відходами» [143], воно може здійснюватися контейнеризацією або іммобілізацією, що в принципі неможливо без попереднього вилучення ПВМ з місць

---

---

їх розташування. Разом з тим, додаткові інженерні бар'єри можуть бути створені всередині об'єкта «Укриття» без вилучення ПВМ, проте це не вирішує проблему безпеки, зокрема у довгостроковій перспективі: «... В небезпечних умовах аварійного об'єкта неможливо досягти повністю підконтрольного і ядерно безпечного стану ПВМ. Для досягнення повного контролю над джерелами ядерної та радіаційної безпеки необхідно вилучення ПВМ...» [142, п. 3.2].

Отже, в документах [11, 141, 142] закладені певні протиріччя і невизначеність у частині вимог стосовно майбутньої діяльності щодо вилучення ПВМ із об'єкта «Укриття» після введення в експлуатацію НБК.

На сьогодні статус об'єкта «Укриття» без урахування НБК охарактеризовано НРБУ-97/Д-2000 [144] як «місце поверхневого зберігання неорганізованих РАВ (тимчасове сховище неорганізованих РАВ, яке знаходиться в стадії стабілізації і реконструкції)». Підставою для кваліфікації об'єкта «Укриття» як тимчасового сховища РАВ було припущення, що матеріали, які містять ядерне паливо, ні зараз і ніколи в майбутньому не можуть бути використані. На наш погляд, такий статус не є коректним, враховуючи, що ПВМ, які є в об'єкті «Укриття», внесені в інвентарний список ядерних матеріалів і до них застосовуються гарантії МАГАТЕ.

Крім того, з огляду на те що ПВМ є головним джерелом небезпеки об'єкта «Укриття», а також його своєрідною візитівкою, то логічним було б у визначенні статусу об'єкта «Укриття» сказати про наявність у ньому матеріалів, які містять ядерне паливо. Після введення в експлуатацію конфайнмента об'єкт «Укриття» буде інтегрований у комплекс НБК, що потребує визначення статусу цього новоутворення.

### **6.1.1 Поводження з ядерними матеріалами**

В Україні державна система гарантій (гарантій нерозповсюдження ядерної зброї), метою якої є забезпечення того, що ядерні матеріали, устаткування і технології, які використовуються в мирних цілях, не будуть використаними у військових цілях, створена згідно із статтею 67 Закону України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» [145]. Державна система гарантій базується на цьому Законі, положеннях міжнародних і двосторонніх договорів, учасником яких є Україна, і має дві складові:

державну систему обліку і контролю ядерних матеріалів;

державну систему експортно-імпортного контролю ядерних матеріалів, устаткування, технологій.

Згідно з Законом [145], організацію та ведення державного обліку і контролю ядерних матеріалів в Україні покладено на Державну інспекцію ядерного регулювання України (Держатомрегулювання), а відповідальність за здійснення обліку і контролю ядерних матеріалів на ядерних установках несе експлуатуюча організація.

Усі ядерні матеріали України підлягають обліку і контролю з боку МАГАТЕ на підставі «Угоди між Україною та Міжнародним агентством з атомної енергії про

---

---

застування гарантій у зв'язку з Договором про нерозповсюдження ядерної зброї», (Угода ратифікована Законом № 737/97 від 17.12.97 [146]).

На Чорнобильській АЕС, зокрема на об'єкті «Укриття», облік ядерних матеріалів провадиться відповідно до Закону України «Про ратифікацію Додаткового протоколу до Угоди між Україною і Міжнародним агентством з атомної енергії про застосування гарантій згідно з Угодою про нерозповсюдження ядерної зброї» [147] і «Положення про державну систему обліку та контролю ядерних матеріалів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 18.12.1996 № 1525 (із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 1006 від 09.08.2001 і № 257 від 25.03.2009) [148].

Із самого початку застосування гарантій МАГАТЕ стосовно ядерних матеріалів об'єкта «Укриття» виникали складнощі щодо постановки їх під гарантії [149]. Насамперед це було пов'язано з неможливістю використовувати стандартні процедури обліку, що застосовують до неаварійних ядерних матеріалів Чорнобильської АЕС, а також з неможливістю ідентифікувати заявлені ядерні матеріали. Тому під час постановки під гарантії МАГАТЕ ядерних матеріалів об'єкта «Укриття» прийняли компромісне рішення про заявлення кількості ядерних матеріалів на момент перед аварією, тобто станом на 25 квітня 1986 року. Надалі планували вести облік ядерних матеріалів у процесі вилучення їх з об'єкта «Укриття», з дотриманням усіх процедур обліку ядерних матеріалів, що викладені в нормативно-правовій і нормативно-технічній документації, чинній в Україні та погодженій з МАГАТЕ. Передбачалось, що на початок вилучення ПВМ з об'єкта «Укриття» в Україні буде розроблена й погоджена з МАГАТЕ нормативно-правова і нормативно-технічна документація щодо поводження з аварійними відходами, які містять ядерні матеріали.

Сучасна нормативно-правова і нормативно-технічна документація в Україні не регламентує поводження з аварійними РАВ, які містять ядерні матеріали, що розщеплюються. З усієї чинної нормативно-правової документації України до аварійних ядерних матеріалів об'єкта «Укриття» можна застосувати лише визначення «відходи, що підлягають збереженню» [146].

У статті 98 Угоди [146] зазначено, що відходи, які підлягають збереженню, являють собою ядерний матеріал, який отримано в результаті обробки чи технологічної аварії та вважається на цей момент таким, що не регенерується, але підлягає збереженню. Згідно з наведеним формулюванням ядерний матеріал розглядається як відходи, які підлягають збереженню; зміни інвентарної кількості матеріалу в інвентарних записах і звітах визначаються як матеріал, «переведений у відходи, що підлягають збереженню». Матеріал, переведений у відходи, що підлягають збереженню, зберігається в зоні балансу матеріалу і залишається предметом гарантій МАГАТЕ, але не включається в інвентарний список ядерного матеріалу зони балансу матеріалу.

Проте Угода [146], а також погоджена з МАГАТЕ нормативно-правова і нормативно-технічна документація не містять рекомендацій стосовно процедури переведення

---

---

аварійних ядерних відходів у відходи, що підлягають збереженню. Тому, плануючи вилучення ПВМ у процесі перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему, з огляду на викладене, а також у зв'язку з відсутністю в Україні нормативно-технічної документації, що передбачає процедури переведення аварійних ядерних матеріалів до відходів, які підлягають збереженню, перш за все треба розробити нормативно-правову і нормативно-технічну документацію, що забезпечує й підтримує вилучення ПВМ. Зокрема, належить окреслити процедури переведення ПВМ до категорії «відходи, що підлягають збереженню», і вимоги щодо технологій поводження з цим видом відходів. Розробка такої документації має бути закінчена до початку вилучення ПВМ з об'єкта «Укриття». У списку першочергових завдань мають бути розробка та затвердження методики оцінювання кількості ядерних матеріалів у ПВМ об'єкта «Укриття».

Лише невелику частку ядерних матеріалів об'єкта «Укриття» можна виміряти за допомогою методик і вимірювального устаткування, що є на цей час для оцінювання кількості ядерних матеріалів в ядерному паливі реакторів типу РБМК. До таких ядерних матеріалів належать відпрацьовані ТВЗ з південного басейну витримки і свіжі ТВЗ, які на момент аварії були на східній стіні центрального залу четвертого енергоблока. Вважається, що під час активної фази аварії ТВЗ з південного басейну витримки могли залишитись неушкодженими, а ТВЗ, які на момент аварії були на східній стіні центрального залу четвертого енергоблока, зазнали лише механічних пошкоджень [149]. Це дає змогу за допомогою наявних методик та устаткування оцінити кількість ядерних матеріалів, але тільки за умови наявних можливостей доступу до них.

На сьогодні відсутні вимоги як до вибору устаткування для вимірювання аварійних ядерних матеріалів, так і до методики оцінки кількості ядерних матеріалів.

Розробка методики визначення кількості ядерних матеріалів в аварійних утвореннях об'єкта «Укриття» (переважно це стосується ЛПВМ і фрагментів активної зони реактора) має бути націленою на обґрунтування можливості або неможливості використання цих матеріалів для створення ядерної зброї. Отже, спочатку треба оцінити перспективи регенерації збагаченого урану та плутонію з ПВМ об'єкта «Укриття», враховуючи всі відомі у світовій практиці методи регенерації ядерних матеріалів, і дати техніко-економічне обґрунтування процесу регенерації. Методика також має містити вимоги до устаткування з оцінювання кількості ядерних матеріалів в аварійних утвореннях об'єкта «Укриття».

Наступним етапом, після розробки методики оцінки кількості ядерних матеріалів в аварійних утвореннях об'єкта «Укриття» (ПВМ), має бути створення нормативно-технічної документації, що визначатиме процедури виділення аварійних ядерних матеріалів об'єкта «Укриття» до окремої групи відходів, що підлягають збереженню, і критерії об'єднання таких ядерних матеріалів в окремі партії.



---

---

Зокрема, в нормативно-технічній документації мають висвітлюватись питання ядерної безпеки у сфері поводження з відходами, що підлягають збереженню, а також класифікація їх. Класифікація може базуватися, ймовірно, на застосуванні критеріїв з потужності експозиційної дози (ПЕД) з урахуванням процентного вмісту ізотопів збагаченого урану і плутонію у відходах.

У нормативно-технічній документації, що розроблятиметься, має бути показано, як оцінити можливість використання для відходів, що підлягають збереженню, наявних на сьогодні контейнерів, призначених для зберігання/транспортування РАВ; за результатами оцінки — передбачити у разі потреби можливість їх модернізації або розробку принципово нових контейнерів для зберігання/транспортування відходів, що підлягають збереженню.

Кількість ядерних матеріалів об'єкта «Укриття», які можуть належати до відходів, що підлягають збереженню, оцінюється на рівні від 127,6 до 140 т (U) [149]. Це чимала кількість аварійних відходів, які за своїми фізико-хімічними характеристиками не відповідають критеріям прийому жодного з наявних в Україні сховищ РАВ. Отже, ще до початку процесу вилучення ПБМ з об'єкта «Укриття» потрібно визначитися з організацією місць тимчасового зберігання і/або захоронення відходів, що підлягають збереженню, та правилами їх транспортування. Вимоги до місць тимчасового зберігання і/або захоронення відходів, що підлягають збереженню, мають передбачати можливість інспектування фахівцями МАГАТЕ. Такі місця доцільно розташувати в межах промайданчика Чорнобильської АЕС, оскільки згідно з Угодою [146] матеріал, переведений у відходи, що підлягають збереженню, зберігається в зоні балансу матеріалу і залишається предметом гарантій МАГАТЕ.

В об'єкті «Укриття» крім аварійних ядерних матеріалів, що можуть бути віднесені до відходів, які підлягають збереженню, є певна частка аварійних ядерних матеріалів, до яких неможливо забезпечити застосування процедур державного обліку і контролю, а також інспектування представниками МАГАТЕ ні зараз, ні в майбутньому. До таких ядерних матеріалів належать пил фрагментів активної зони (частинки мікронного розміру) і сполуки урану та плутонію у водних розчинах. Тому ці ядерні матеріали потребують якісно іншого підходу, що передбачає розробку критеріїв і процедур зняття їх з державного обліку.

Як бачимо, зараз нормативно-правова і нормативно-технічна документація України у сфері поводження з ядерними матеріалами не повною мірою охоплює окремі проблеми з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему. Лишається відкритим питання дотримання гарантій МАГАТЕ в процесі вилучення ПБМ та поводження з аварійними ядерними матеріалами, зокрема відсутня документація щодо обліку і контролю аварійних ядерних матеріалів, яка забезпечує виконання гарантій МАГАТЕ.

---

---

В Україні створено низку нормативних документів [150—156] щодо загальних вимог, критеріїв та принципів забезпечення безпеки у сфері поводження з ядерним паливом атомних електростанцій, дослідницьких ядерних реакторів, критичних і підкритичних збірок, сховищ відпрацьованого ядерного палива. До таких ядерних матеріалів встановлено вимоги щодо критичності на всіх етапах їх життєвого циклу, а також вимоги до безпечної геометрії скупчень їх.

На об'єкті «Укриття» ми маємо справу з неорганізованими, хаотичними скупченнями ядерно небезпечних матеріалів у вигляді ПВМ, щодо яких існує ризик виникнення критичності. Крім того, ці скупчення схильні до процесу постійного руйнування з утворенням паливного пилу, осідання якого на будівельних конструкціях погіршує радіаційну обстановку всередині об'єкта «Укриття».

Проблема неконтрольованого надходження атмосферних опадів, що створювала ризик виникнення критичності, після встановлення НБК втратила свою актуальність. Але не втрачає актуальності проблема природного руйнування скупчень ПВМ під впливом зовнішніх факторів в умовах НБК, а також через обрушення будівельних конструкцій об'єкта «Укриття» — проблема, яку неможливо виключити навіть з огляду на здійснення стабілізаційних заходів щодо їх підсилення. Наслідком такого процесу може стати неконтрольована зміна геометрії скупчень ПВМ з викидом пилу в простір під НБК.

Для реалізації процесу вилучення і контейнеризації ПВМ потрібна нормативно-правова база з його регламентації для НБК. Отже, потрібен нормативний документ з вимогами до ядерної безпеки безпосередньо самого НБК, який має охоплювати всі етапи поводження в конфайнменті з ПВМ: вилучення, контейнеризацію, організацію місць тимчасового зберігання і/або захоронення, виконання транспортно-технологічних операцій. За потреби, у документі мають бути наведені вимоги до тривалої консервації окремих скупчень ПВМ, вилучення яких не є невідкладним завданням.

Найпроблемнішими ПВМ можна вважати відпрацьовані ТВЗ з південного басейну витримки і фрагментовані свіжі ТВЗ, розташовані на момент аварії на східній стіні центрального залу четвертого енергоблока. Зараз ці ПВМ знаходяться у безпечному підкритичному стані, але ризик підвищення рівня підкритичності не виключений під час вилучення їх та подальшого розміщення на тимчасове зберігання. Щоб убезпечити цей технологічний процес, треба виконати розрахунки безпечних геометричних параметрів при складуванні (розміщення на тимчасове зберігання) вилучених відпрацьованих і частин свіжих ТВЗ.

Зазначимо, що нині існують скупчення ПВМ у глибоко підкритичному стані, а також скупчення поза зоною ризику обрушення будівельних конструкцій, і ці скупчення не підлягають першочерговому (невідкладному) вилученню. Для них доцільно передбачити можливість консервації на тривалий час.

---

---

Для ПВМ, які підлягають першочерговому вилученню, треба розробити комплекс технологічних заходів щодо вивезення їх за межі НБК та розміщення як на довготривале зберігання і/або захоронення, так і на тимчасове зберігання в просторі під НБК. Питання тимчасового зберігання в просторі під НБК є назрілим через дефіцит сховищ, здатних прийняти на зберігання значну кількість відходів цього виду. Рішення щодо організації місць тимчасового зберігання в просторі під НБК може стосуватись ПВМ, які належать до відходів, що підлягають збереженню, з урахуванням класифікації виду відходів. Зауважимо, що розробка класифікації відходів, що підлягають збереженню, може стати в нагоді як для обліку ядерних матеріалів об'єкта «Укриття», так і для провадження заходів у сфері поводження з ПВМ. Наприклад, згідно з класифікацією відходів, що підлягають збереженню, місця тимчасового зберігання організовують лише для ПВМ з мінімально можливим рівнем потужності дози (ПД) іонізуючого випромінювання і малим відсотком вмісту ядерного матеріалу (меншим за 1).

З огляду на сказане можна зробити висновок щодо обов'язковості проведення комплексу досліджень для створення нормативного документа із забезпечення ядерної безпеки НБК, а саме:

- оцінки всіх скупчень ПВМ зважаючи на їх підкритичність;
- оцінки фізичної безпеки скупчень ПВМ (під кутом зору ризику обрушення будівельних конструкцій);
- прогновної оцінки стабільності скупчень ПВМ (взявши до уваги ризик руйнування скупчень під впливом природних зовнішніх факторів);
- розрахунку безпечної геометрії зберігання всіх видів ПВМ, зокрема віднесених до відходів, що підлягають збереженню.

Документ, що пропонується до розроблення, повинен містити вимоги до забезпечення критичності на всіх етапах виконання транспортно-технологічних операцій з поводження з ПВМ.

### **6.1.2 Поводження з радіоактивними відходами**

**Система класифікації РАВ в Україні.** Одним з ключових завдань із забезпечення подальшого перетворення об'єкта «Укриття» є визначення чітких критеріїв довгострокового зберігання і захоронення ПВМ та інших РАВ після їх вилучення.

Згідно з [143, 144, 157—159] РАВ поділяють на два типи, чотири групи та три категорії: на типи — за критерієм допустимого захоронення; на групи — за критерієм рівня вилучення; на категорії — за критерієм питомої активності.

За критеріями допустимого захоронення вирізняють короткоіснуючі та довгоіснуючі типи РАВ. Короткоіснуючі РАВ можуть бути захоронені в поверхневих або приповерхневих сховищах, довгоіснуючі РАВ — у стабільних глибоких геологічних формаціях. Для поділу РАВ на типи треба виконати оцінку очікуваних через

300 років після їх захоронення доз потенційного опромінення (ДПО) населення, аналізуючи п'ять референтних сценаріїв опромінення, які відповідають п'яти головним шляхам формування доз [144]:

- надходження радіонуклідів з питною водою;
- надходження радіонуклідів з продуктами харчування;
- інгаляційний;
- зовнішнє  $\gamma$ -опромінення, дистанційне та контактне  $\beta$ -опромінення шкіри;
- випадкове проковтування дрібних фрагментів речовини РАВ.

Для кожного з п'яти сценаріїв у НРБУ-97/Д-2000 [144] наведено відповідні референтні параметри і характеристики для оцінки доз опромінення. Отримані за результатами аналізу сценаріїв значення доз порівнюють з рівнями, встановленими НРБУ-97/Д-2000 [144], і в такий спосіб визначають тип РАВ і тип допустимого захоронення РАВ:

ДПО  $< 1 \text{ мЗв} \cdot \text{рік}^{-1}$  — короткоіснуючі РАВ (підлягають захороненню в поверхневих або приповерхневих сховищах);

ДПО  $> 50 \text{ мЗв} \cdot \text{рік}^{-1}$  — довгоіснуючі РАВ (підлягають захороненню в стабільних глибоких геологічних формаціях);

$1 \leq \text{ДПО} \leq 50 \text{ мЗв} \cdot \text{рік}^{-1}$  — тип РАВ і допустимий тип захоронення визначають за погодженням з органами державного регулювання.

Встановлені ОСПУ-2005 [157] за критерієм рівня вилучення групи РАВ та за критерієм питомої активності категорії РАВ наведено в табл. 6.1 та 6.2.

**Таблиця 6.1 — Класифікація радіоактивних відходів за критерієм рівня вилучення**

Група РАВ	Тверді РАВ	Рівень вилучення, $\text{кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$
1	Трансуранові $\alpha$ -випромінюючі радіонукліди	0,1
2	$\alpha$ -випромінюючі радіонукліди	1,0
3	$\beta$ -, $\gamma$ -випромінюючі радіонукліди (за винятком віднесених до групи 4)	10
4	$^3\text{H}$ , $^{14}\text{C}$ , $^{36}\text{Cl}$ , $^{45}\text{Ca}$ , $^{53}\text{Mn}$ , $^{55}\text{Fe}$ , $^{59}\text{Ni}$ , $^{63}\text{Ni}$ , $^{93\text{m}}\text{Nb}$ , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , $^{109}\text{Cd}$ , $^{135}\text{Cs}$ , $^{147}\text{Pm}$ , $^{151}\text{Sm}$ , $^{171\text{m}}\text{Tm}$ , $^{204}\text{Tl}$	100

Аналіз наявної в Україні системи класифікації РАВ свідчить про властиві їй суттєві недоліки, а саме:

1. Відсутній чіткий взаємозв'язок між категоріями і типами РАВ. Сортування РАВ на категорії низько-, середньо- та високоактивні (НАВ, САВ і ВАВ) за критерієм питомої активності (див. табл. 6.2), що здійснюється на підприємствах (об'єктах),



де утворюються РАВ, у жодному разі не встановлює допустимий тип захоронення. Наприклад, САВ залежно від радіонуклідного складу та за результатами аналізу п'яти референтних сценаріїв опромінення (згідно з вимогами [144]) можуть бути захоронені як у приповерхневому сховищі, так і в стабільних глибоких геологічних формаціях. Це значить, що до передавання РАВ на захоронення потрібно виконати їх повторне сортування з урахуванням критеріїв приймання РАВ на захоронення в тому чи іншому сховищі.

**Таблиця 6.2 — Класифікація РАВ за критерієм питомої активності**

Категорія РАВ	Значення питомої активності, кБк/кг			
	α-радіонукліди		β-, γ-радіонукліди	
	група 1	група 2	група 3	група 4
Низькоактивні відходи (НАВ)	$> 10^{-1} < 10^1$	$> 10^0 < 10^2$	$> 10^1 < 10^3$	$> 10^2 < 10^4$
Середньоактивні відходи (САВ)	$\geq 10^1 < 10^5$	$\geq 10^2 < 10^6$	$\geq 10^3 < 10^7$	$\geq 10^4 < 10^8$
Високоактивні відходи (ВАВ)	$\geq 10^5$	$\geq 10^6$	$\geq 10^7$	$\geq 10^8$

2. Вимога НРБУ-97/Д-2000 [144] щодо обов'язкового аналізу п'яти референтних сценаріїв опромінення та відповідних референтних параметрів і характеристик для цих сценаріїв є занадто консервативною з огляду на те, що наявні та перспективні сховища для захоронення РАВ розташовані в зоні відчуження, зокрема в тій її частині, що планується для промислового використання і де заборонено постійне проживання людей. Важко уявити, що через 300 років джерело питного водопостачання буде споруджене безпосередньо над тілом сховища або на несуттєвій відстані від нього, або ж реалізовуватиметься сценарій «випадкове проковтування дрібних фрагментів речовини РАВ» з річним надходженням радіоактивних матеріалів 0,05 кг. Зважаючи на вимоги НРБУ-97/Д-2000 [144], об'єкт «Укриття» після вилучення ПВМ ніколи не зможе бути перетворений на поверхнєве сховище РАВ. Тому набір сценаріїв потенційного опромінення населення має бути уточнений з урахуванням розміщення сховищ РАВ стосовно місць постійного проживання населення.

3. Незважаючи на те що в Україні накопичена величезна кількість РАВ внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС, класифікація РАВ за критерієм питомої активності консервативніша, ніж у рекомендаціях МАГАТЕ. Зокрема, у стандарті МАГАТЕ [160] визначені типові значення об'ємної концентрації радіонуклідів для високоактивних відходів у  $10^4$ — $10^6$  ТБк · м<sup>-3</sup>, що для ПВМ за консервативних значень їх питомої ваги 3000 кгс · м<sup>-3</sup> становить приблизно  $3 \cdot 10^9$ — $3 \cdot 10^{11}$  кБк · кг<sup>-1</sup>. Згідно з даними, наведеними у табл. 6.2, до ВАВ належать відходи групи 3 питомою активністю

---

10<sup>7</sup> і більше — нижче, ніж у стандарті МАГАТЕ [160] на два з гаком порядки. Крім того, за стандартом МАГАТЕ [160] до ВАВ належать відходи з тепловиділенням понад 2 кВт · м<sup>-3</sup>. Натомість відповідно до ОСПУ-2005 [157] до ВАВ також належать «низькотемпературні» відходи, тепловиділення яких у місцях тимчасового зберігання або в захороненнях не перевищує 2 кВт · м<sup>-3</sup>. Отже, прийнята в Україні система класифікації РАВ, що базується на використанні занадто консервативних критеріїв, може призвести до значних економічних витрат на захоронення РАВ, якщо її залишити без змін.

4. Чинними донедавна в Україні «Санитарними правилами обращения с радиоактивными отходами» (СПОРО-85) за один з критеріїв класифікації РАВ брався рівень поверхневого забруднення. Оскільки в об'єкті «Укриття» переважна кількість матеріалів, конструкцій і обладнання мають саме поверхнєве забруднення, запровадження критерію класифікації РАВ за рівнем поверхневого забруднення суттєво б спростило та пришвидшило процес сортування їх.

**Удосконалення системи класифікації РАВ.** За підтримки Єврокомісії в рамках Програми міжнародного співробітництва з ядерної безпеки у 2011—2012 роках експерти консорціуму DBE TECHNOLOGY GmbH (Німеччина), ANDRA (Франція), COVRA (Нідерланди), ENRESA (Іспанія) і SKB International AB (Швеція), з широким залученням українських експертів, розробили проєкт INSC U4.01/08-C «Удосконалення системи класифікації РАВ в Україні». Основні результати виконання цього проєкту наведені в [161, 162].

Першим кроком, спрямованим на удосконалення системи класифікації РАВ, стало впровадження класу дуже низькоактивних відходів (ДНАВ), що знайшло своє відображення у прийнятому Законі України «Про внесення змін до деяких законів України щодо вдосконалення законодавства у сфері поводження з радіоактивними відходами» [163]. Цей Закон набирає чинності 07 листопада 2021 року.

До дуже низькоактивних відходів належать РАВ, активність радіонуклідів в яких перевищує рівні вилучення або звільнення від регулюючого контролю (нижня межа віднесення відходів до ДНАВ), проте за своїми радіологічними характеристиками вони можуть передаватися на захоронення в найпростіші поверхневі сховища.

У діяльності з перетворення об'єкта «Укриття» введення класу ДНАВ матиме позитивний вплив, оскільки частина РАВ, що утворюватимуться під час виконання робіт, за рівнем забруднення відноситимуться до ДНАВ. Насамперед це вторинні відходи, представлені забрудненими ЗІЗ, інструментами та іншим обладнанням, яке не підлягає дезактивації.

Згідно з пропозиціями, викладеними в [161, 162], до НАВ треба віднести відходи, захоронення яких у приповерхневих сховищах, обладнаних системою багатобар'єрного захисту, дасть змогу досягнути цілі безпеки за тривалості адміністративного

---

---

контролю не більше ніж 300 років. Клас НАВ приблизно відповідає типу «короткоіснуючі відходи» відповідно до прийнятої класифікації [144, 157]. За верхню межу віднесення до НАВ, згідно з рекомендаціями МАГАТЕ [160], прийнято максимально допустиму сумарну питому активність  $\alpha$ -випромінюючих радіонуклідів 4000 кБк/кг (в окремій упаковці) наприкінці періоду адміністративного контролю при 400 кБк/кг у середньому по сховищу.

Отже, значна частина РАВ об'єкта «Укриття», які за документами [144, 157] належали до короткоіснуючих відходів, після введення запропонованої схеми класифікації належатимуть до ДНАВ.

Відповідно до запропонованої модифікованої класифікації [161, 162], за САВ вважатимуть радіоактивні відходи, які вимагають захоронення в сховищах на проміжних глибинах або на великих глибинах разом з ВАВ. Клас САВ приблизно відповідає типу «довгоіснуючі відходи» [144, 157]. Як нижню межу віднесення до САВ рекомендується використовувати питому активність  $\alpha$ -випромінюючих радіонуклідів (щонайменше 4000 кБк/кг). Верхня межа визначається рівнем тепловиділення до 2 кВт/м<sup>3</sup>.

За такої системи класифікації до САВ належатиме значна частина відходів об'єкта «Укриття». До ВАВ включатимуться радіоактивні відходи, які можуть бути захоронені тільки в глибинних сховищах; вони характеризуються високою питомою активністю ( $10^4$ — $10^6$  ТБк · м<sup>-3</sup>), більшим ніж 2 кВт/м<sup>3</sup> тепловиділенням і високим вмістом довгоіснуючих радіонуклідів.

Попередні результати розрахунків [164] показали, що енерговиділення ПВМ на 2060 рік становитиме 0,36 кВт/м<sup>3</sup>, а на 2120 рік — 0,12 кВт/м<sup>3</sup>. Отже, на той час, коли найімовірніше вилучатимуть ПВМ, відповідно до запропонованої модифікованої класифікації [161, 162] в об'єкті «Укриття» практично не буде ВАВ, які потребуватимуть захоронення у стабільних глибоких геологічних формаціях. ПВМ можуть бути віднесені до класу САВ (згідно з [161, 162]) і захоронені у сховищі на середніх глибинах.

Закон України [163] дає таке визначення для сховища на середніх глибинах: це споруда, облаштована на глибині від кількох десятків до сотень метрів від поверхні землі з метою забезпечення утримання та ізоляції радіоактивних відходів від біосфери. Прийняття Закону України [163] створює передумови для внесення відповідних змін до інших нормативних документів у сфері поводження з РАВ, зокрема до НРБУ-97/Д-2000 [144] та ОСПУ-2005 [157].

Впровадження модифікованої системи класифікації РАВ, запропонованої за результатами [161, 162], позитивно вплине на діяльність з подальшого перетворення об'єкта «Укриття», оскільки допоможе істотно зменшити витрати на захоронення РАВ завдяки використанню економічніших варіантів їх ізоляції від біосфери.

---

## 6.2 Демонтаж нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття»

### 6.2.1 Концептуальні рішення щодо демонтажу нестабільних конструкцій

За результатами натурних обстежень та розрахункових оцінок технічного стану будівельних конструкцій об'єкта «Укриття» були виявлені конструкції, ймовірність обвалення яких неприпустимо велика (так звані нестабільні конструкції).

Реалізовані у 2004—2008 роках невідкладні стабілізаційні заходи забезпечують прийнятний рівень безпеки об'єкта «Укриття» з огляду на 15-річний термін експлуатації стабілізованих конструкцій (до кінця 2023 року). Надалі проблема нестабільних конструкцій має вирішуватись демонтажем їх усередині НБК. Потреба демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» зумовлена низкою причин:

імовірність обвалення цих конструкцій навіть в умовах експлуатації всередині НБК є досить високою і з кожним роком зростатиме;

у разі потенційного обвалення нестабільних конструкцій інтенсивно підійматимуться радіоактивний пил і аерозолі, через що зазнають суттєвого радіоактивного забруднення конструкції та технологічні системи НБК; це погіршить радіаційну обстановку та призведе до додаткового опромінення експлуатаційного персоналу, а також зумовить потребу в проведенні затратних робіт з дезактивації;

обвалення нестабільних конструкцій матиме негативні наслідки для довкілля, оскільки частина радіоактивних речовин через систему вентиляції та нещільності буде викинута за межі НБК;

падіння нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» на пошкоджені конструкції четвертого енергоблока може спровокувати обвалення їх і призвести до руйнування наявних інженерних бар'єрів навколо скупчень ПВМ, що матиме негативні наслідки для рівня ядерної та радіаційної безпеки;

обвалення нестабільних конструкцій створить згодом певні проблеми у діяльності з перетворення об'єкта «Укриття», оскільки ускладнить доступ до ПВМ з метою переведення їх у контрольований стан, зокрема вилучення.

Попередній перелік нестабільних будівельних конструкцій об'єкта «Укриття», що потребують демонтажу, визначили під час досліджень на початковому етапі робіт, передбачених Планом здійснення заходів на об'єкті «Укриття» (ПЗЗ ОУ) [165]. Цей перелік склали на підставі оцінок надійності конструкцій без урахування радіаційних наслідків потенційного обвалення їх, а також не взявши до уваги, що після закінчення будівництва НБК вирішальним зовнішнім чинником в оцінці ймовірності відмови будівельних конструкцій об'єкта «Укриття» стане сейсмічний вплив. Інші види впливу (сніг, вітер і смерч) втрачають свою актуальність. Зважаючи на це, виконана переоцінка складу нестабільних конструкцій, що підлягають так званому ранньому або відкладеному демонтажу [5, 166, 167].



---

---

*Ранній демонтаж* — це перший етап виконання першочергових робіт із демонтажу нестабільних конструкцій, що має розпочатися відразу після введення в експлуатацію НБК і закінчитись до кінця 2023 року.

*Відкладений демонтаж* — це другий етап виконання демонтажних робіт, який має розпочатися відразу після закінчення першого етапу і є продовженням раннього демонтажу.

Переоцінку складу нестабільних конструкцій, що підлягають ранньому або відкладеному демонтажу, виконували з урахуванням таких критеріїв і вимог:

якщо ймовірність обвалення дорівнює  $10^{-2}$  рік<sup>-1</sup> і більше, конструкції підлягають ранньому демонтажу;

якщо ймовірність обвалення відповідальної несучої конструкції лежить у межах від  $10^{-2}$  рік<sup>-1</sup> до  $10^{-4}$  рік<sup>-1</sup> і більше, питання про її ранній чи відкладений демонтаж вирішується на підставі аналізу радіаційних наслідків обвалення;

якщо ймовірність обвалення конструкції нижча за  $10^{-4}$  рік<sup>-1</sup>, конструкція підлягає відкладеному демонтажу;

обов'язковим є забезпечення стійкості або виконання демонтажу суміжних конструкцій, пов'язаних з конструкціями, що підлягають демонтажу (наприклад, якщо демонтують несучу конструкція, то демонтують також конструкції, що на неї опираються).

За результатами виконаної переоцінки до переліку конструкцій для раннього демонтажу увійшло 17 конструкцій; з них 14 металоконструкцій і одна бетонна східна опора балки «Мамонт» були зведені під час будівництва об'єкта «Укриття» і формують його зовнішній контур (рис. 6.1), а також завали на деаераторній етажерці та аварійні плити покриття деаераторної етажерки.

До відкладеного демонтажу увійшли балки Б1, Б2, Б3 і Б5, об'ємний блок «собачий дім», завали та плити перекриття над прим. 805/3, залізобетонна стіна по осі 50 вище за позначку 49.00 (рис. 6.2).

У розроблених концептуальних рішеннях щодо демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» [168, 169] визначено обсяг і послідовність виконання демонтажних робіт, запропоновано принципові технологічні схеми поводження з різними видами РАВ, а також передбачено:

створення інфраструктури для виконання робіт з демонтажу нестабільних конструкцій всередині НБК;

розширення і модернізацію наявної інфраструктури поводження з РАВ на майданчику Чорнобильської АЕС для поводження з усіма видами РАВ, а особливо з ВАВ, утворення яких прогнозується під час розбирання завалів на верхніх позначках об'єкта «Укриття»;

можливість тимчасового зберігання РАВ, що не відповідають критеріям приймання до захоронення на пункті зберігання РАВ «Буряківка» або комплексі «Вектор», на спеціальному майданчику, розташованому всередині НБК (у районі піонерної стіни вздовж машинного залу).

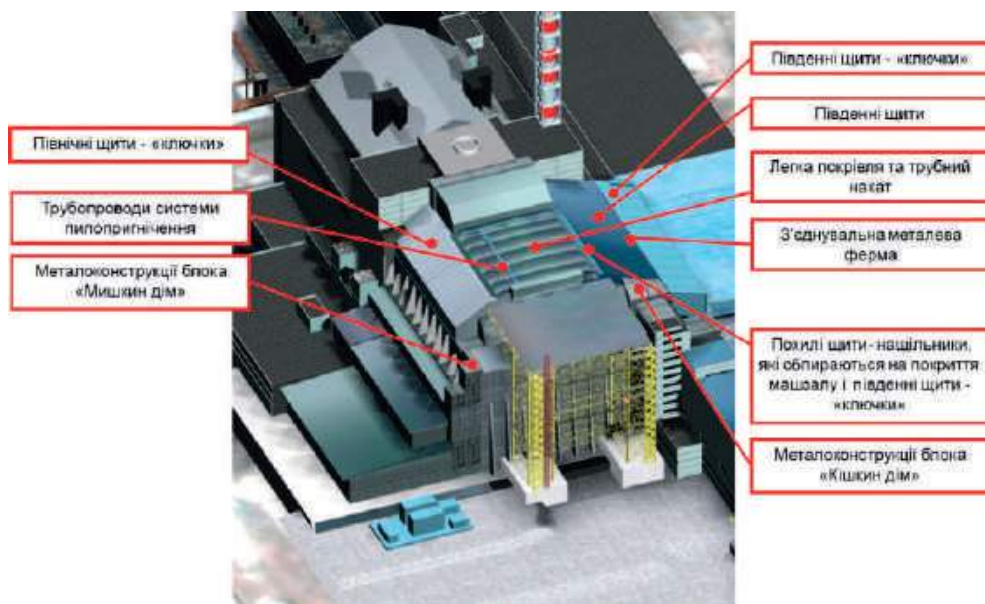


Рис. 6.1 — Перелік конструкцій для раннього демонтажу

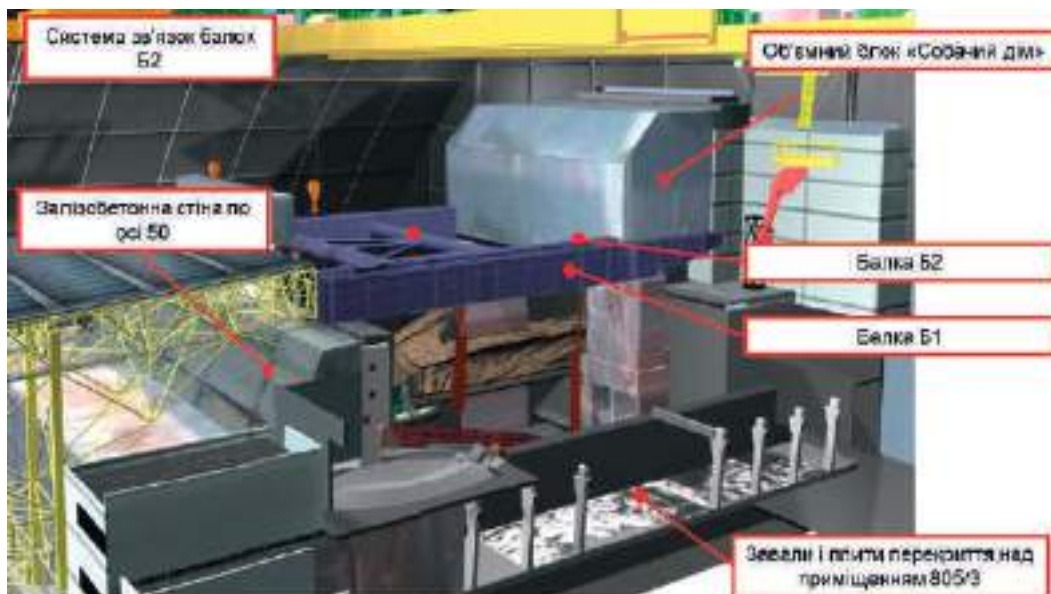


Рис. 6.2 — Перелік конструкцій для відкладеного демонтажу

---

---

Конструкції, що підлягають демонтажу, мають радіоактивне забруднення і тому кваліфікуються як РАВ. Очікується утворення чотирьох основних потоків РАВ:

1. Радіоактивно забруднені металеві конструкції — масивні елементи конструкцій, установлені після аварії. Мають значні габарити і потребують великого обсягу робіт з фрагментації для можливості подальшого поводження.

2. Радіоактивно забруднені залізобетонні конструкції — великі елементи бетонних і залізобетонних конструкцій зруйнованого четвертого енергоблока і опорних конструкцій об'єкта «Укриття». Ці конструкції можуть бути як на своїх проєктних місцях, так і в завалах.

3. Змішані РАВ — дрібні фрагменти будівельних конструкцій, систем і комунікацій, що утворилися внаслідок аварії 1986 року; матеріали, що використовувались під час ліквідації її наслідків (матеріали засипки, які скидалися з гелікоптерів, «свіжий» бетон і мішки з бетонною сумішшю, що використовувались на будівництві об'єкта «Укриття»); матеріали, утворені в результаті стабілізаційних заходів, тощо. Змішані РАВ мають здебільшого об'ємне забруднення.

4. ВАР — фрагменти конструкцій і елементи завалів, які за радіаційними характеристиками належать до високоактивних РАВ.

Об'єкти (майданчики) у межах НБК, де здійснюватиметься поводження з РАВ демонтажу, наведено на рис. 6.3.

Оскільки демонтаж нестабільних конструкцій провадитиметься в умовах об'єкта «Укриття» зі складною радіаційною обстановкою та за наявності інших небезпечних факторів (ризиків руйнування пошкоджених конструкцій і окремих елементів, перепади висот, наявність отворів тощо), треба впроваджувати всебічно зважені технологічні рішення з організації безпечного виконання демонтажних робіт та вибору ефективних заходів для забезпечення радіаційного захисту персоналу і довкілля. Для реалізації такого роду завдань ІПБ АЕС пропонує використовувати сучасні методи комп'ютерного моделювання, що передбачають:

просторове моделювання будівельних конструкцій об'єкта «Укриття» і НБК, технологічних операцій з демонтажу нестабільних конструкцій та поводження з РАВ за допомогою систем автоматизованого проєктування і тривимірної графіки та анімації;

моделювання радіаційних умов у зонах виконання робіт;

моделювання переміщення персоналу до зон виконання робіт та здійснення ним запланованих операцій з урахуванням витрат часу;

розрахунок накопичених доз опромінення персоналу протягом виконання робіт.

Наприклад, для моделювання радіаційних умов, технологічних операцій і оцінки доз опромінення персоналу під час демонтажу металевої ферми підсилення об'єкта «Укриття» було апробовано програмний комплекс HVRC VRdose Planner, розроблений Інститутом енергетичних технологій (Норвегія). За допомогою програмного комплексу змодельовано та всебічно проаналізовано альтернативні сценарії

Попри позитивні результати, які пов'язані із суттєвим зниженням ризику обвалення конструкцій об'єкта «Укриття» після демонтажу нестабільних конструкцій,

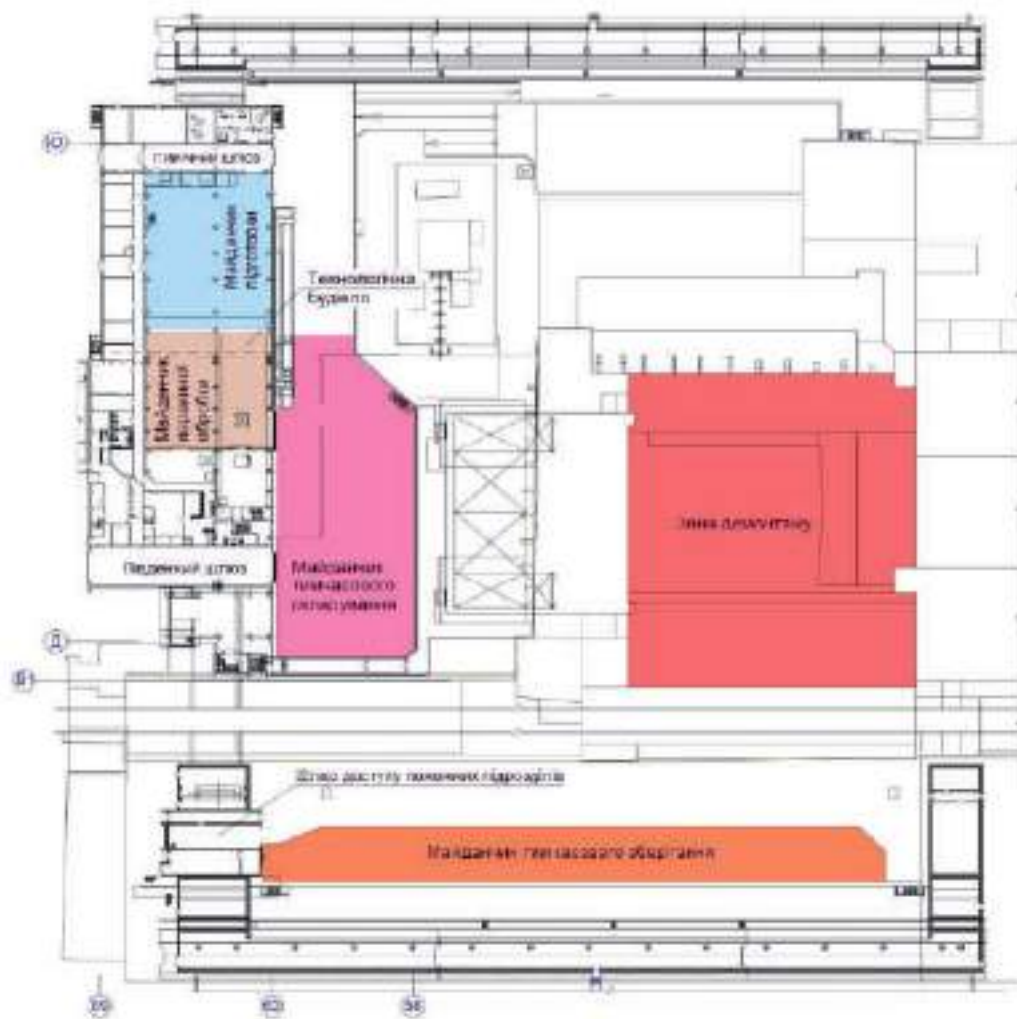


Рис. 6.3 — Об'єкти (майданчики) для поводження з радіоактивними відходами

---

---

є й негативні. Конструкції, що демонтуватимуть, на цей час виконують функцію бар'єрів на шляху виходу за межі об'єкта «Укриття» іонізуючого випромінювання та радіоактивних речовин. За даними [86], після демонтажу нестабільних конструкцій потужність дози в окремих зонах обслуговування НБК збільшиться приблизно втричі, а радіоактивний пил буде основним джерелом забруднення конструкцій і обладнання НБК. Тому нагальною стане потреба в невідкладному вилученні і/або екрануванні відкритих скупчень ПВМ, локалізованих на верхніх позначках розкритого об'єкта «Укриття».

Після реалізації заходів з демонтажу нестабільних конструкцій проблема надійності будівельних конструкцій об'єкта «Укриття» буде розв'язана тільки частково. Річ у тім, що запланована діяльність з демонтажу стосується переважно конструкцій, які формують зовнішню оболонку об'єкта «Укриття». Про технічний стан внутрішніх конструкцій зруйнованого четвертого енергоблока, зокрема конструкцій приміщень, в яких зосереджені ПВМ, інформації набагато менше — цілеспрямовані дослідження в цьому напрямку не проводилися через високий рівень радіації та відсутність доступу. Важливість отримання такої інформації зумовлюється тим, що ймовірне руйнування внутрішніх конструкцій може призвести до неприйнятних радіаційних наслідків для персоналу і довкілля.

Враховуючи результати обстежень внутрішніх конструкцій зруйнованого четвертого енергоблока, виконаних до 1996 року, можна виділити три зони, що характеризують їх технічний стан (рис. 6.5):

- зона 1 — конструкції, розташовані нижче позначки +12.500;
- зона 2 — конструкції, розташовані між позначками +12.500 і +35.500;
- зона 3 — конструкції, розташовані вище позначки +35.500.

Нааявні дані свідчать про відсутність значних ушкоджень несучих конструкцій до позначки +12.500 (зона 1) за винятком місцевих деструктивних руйнувань верхнього шару бетону перекриття під прим. 305/2 внаслідок високотемпературного впливу і тріщин в одній із стін. Відсутність значних ушкоджень пояснюється тим, що конструктивне рішення будівлі реакторного відділення до позначки +12.500 виконано у вигляді жорсткої, об'ємно-просторової структури з монолітного залізобетону. Приміщення, розташовані до позначки +12.500, утворюють систему герметичних приміщень (так званих міцно-щільних боксів) з несучими конструкціями більш як 1 м завтовшки. Тому можна зробити попередній висновок, що надійність цих конструкцій буде збережена як протягом життєвого циклу НБК, так і на більший проміжок часу.

Несучі конструкції реакторного відділення, що розташовані вище за позначку +12.500 (зона 2), являють собою поєднання збірно-монолітних залізобетонних конструкцій (у центральній частині) і збірних конструкцій (на периферійних ділянках). Ці конструкції зазнали більших пошкоджень/руйнувань порівняно



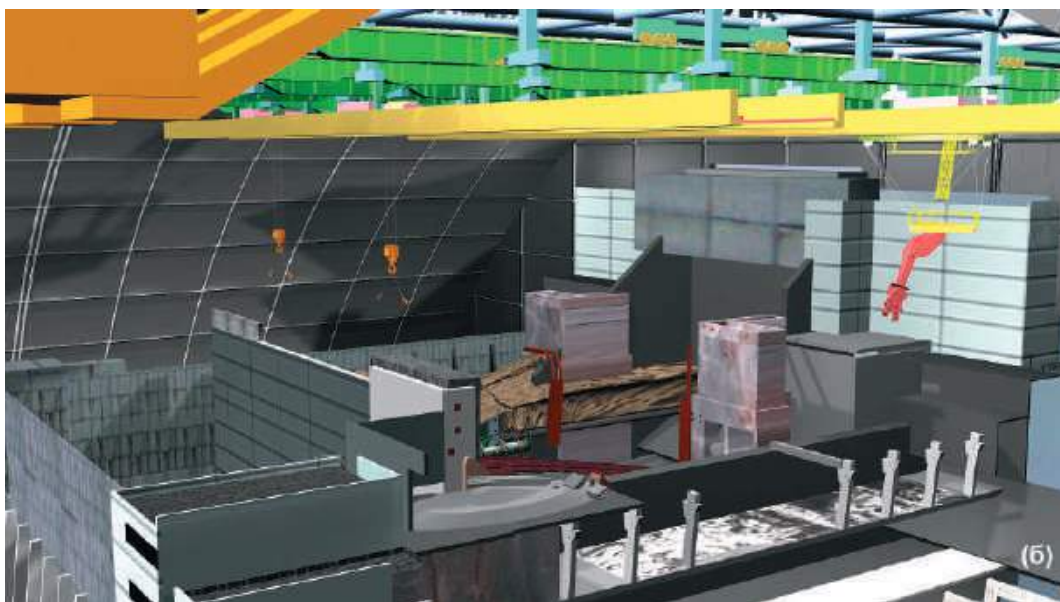
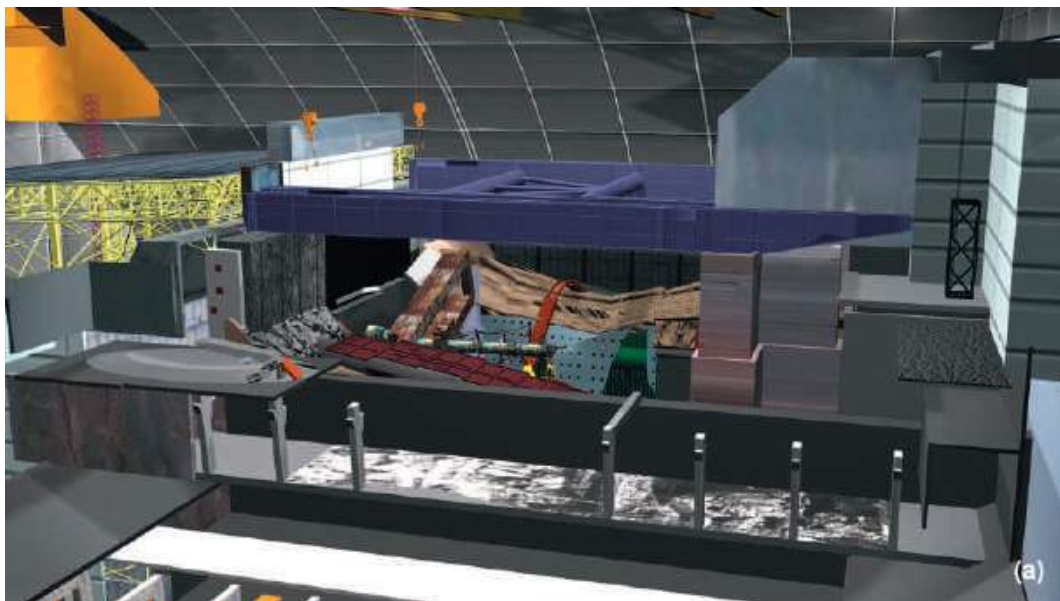


Рис. 6.4 — Вигляд об'єкта «Укриття» на різних етапах демонтажу нестабільних конструкцій:  
 а — після раннього демонтажу; б — після відкладеного демонтажу

з розташованими нижче конструкціями. Від позначки +12.500 до рівня підлоги центрального залу (позначка +35.500) найпроблемнішим є стан конструкцій перекриттів на позначці +30.900 (перекриття під південним і північним барабан-сепараторами), а також на позначці +35.500 (на ділянках центрального залу, зокрема над приміщеннями басейнів витримки), що пов'язано як з ушкодженнями конструкцій перекриттів, так і значним навантаженням від завалів на цих конструкціях. Стабілізувати конструкції практично неможливо (надзвичайно складна радіаційна обстановка, відсутність шляхів доступу тощо). Найперспективнішим

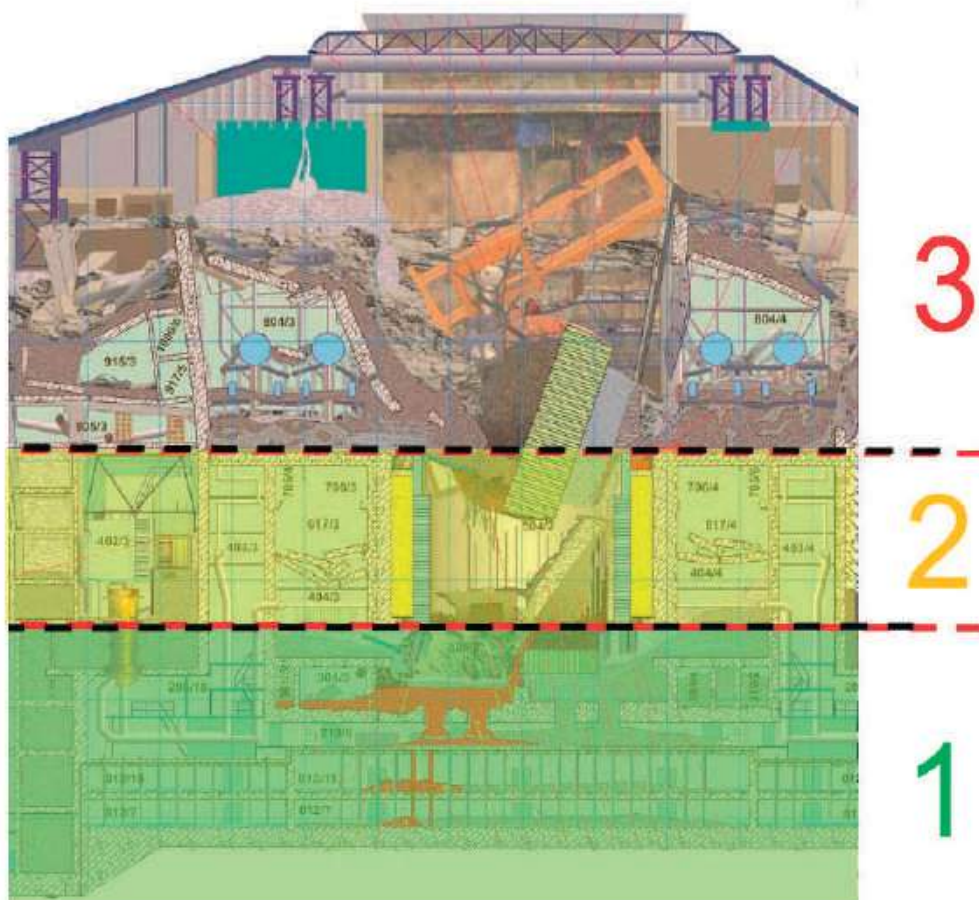


Рис. 6.5 — Стан будівельних конструкцій зруйнованого четвертого енергоблока

---

---

варіантом для підвищення їх рівня надійності є зменшення навантаження на них внаслідок розбирання завалів і демонтажу пошкоджених та зруйнованих конструкцій, розташованих вище (зона 3). Це можна зробити після демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» з використанням системи основних кранів НБК.

Окремою проблемою є нестійке положення верхньої плити біологічного захисту реактора (схема «Е») [170]. З часом імовірність обвалення схеми «Е» в шахту реактора зростає, зокрема внаслідок розвитку корозійних пошкоджень. Обвалення може спричинити руйнування нижчих конструкцій. Зазначимо, що наразі ні геодезичних, ні інших спостережень за станом схеми «Е» не проводиться.

Узагальнюючи сказане, пропонується такий план подальших дій на найближчі 30—50 років:

- створення інфраструктури для демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття», зокрема інфраструктури для поводження з ПВМ, що виявлятимуться в процесі демонтажу;

- демонтаж нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття»;

- вилучення і/або екранування інтенсивних джерел іонізуючого випромінювання (фрагментів ПВМ), локалізованих на верхніх позначках відкритих ділянок розкритого об'єкта «Укриття»;

- розбирання завалів і демонтаж пошкоджених та зруйнованих конструкцій четвертого енергоблока, розташованих на верхніх позначках (вище підлоги центрального залу). Під час розбирання завалів виявлятимуться ПВМ та інші високоактивні відходи, що треба враховувати, плануючи організацію таких робіт. Отриманий при цьому досвід буде надзвичайно корисним для подальшої діяльності з вилучення інших скупчень ПВМ у процесі перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему.

### **6.2.2 Демонтаж з'єднувальної металевої ферми**

З'єднувальна металева ферма (далі — металева ферма) була встановлена в процесі стабілізації південної покрівлі об'єкта «Укриття» з метою з'єднання між собою плоских щитів і щитів-ключок (рис. 6.6).

За результатами виконаної переоцінки складу нестабільних конструкцій, що підлягають ранньому або відкладеному демонтажу, металеву ферму включили до переліку конструкцій для раннього демонтажу. Зауважимо, що технічний стан металевої ферми цілком задовільний, а потреба в її демонтажу зумовлена лише технологічними чинниками: без цього неможливо розібрати інші конструкції південної зони об'єкта «Укриття», віднесені до раннього демонтажу (південні щити, південні щити-ключки, балки «Мамонт» і «Восьминіг»).



Проект демонтажу металевої ферми є першим з переліку проектів демонтажу інших нестабільних конструкцій, що підлягають ранньому демонтажу. Одне із завдань розробки та реалізації цього проекту полягає в тому, щоб продемонструвати можливість та ефективність використання інфраструктури, створеної в рамках НБК, а також обґрунтувати потребу в додатковому оснащенні ділянок/систем НБК для провадження діяльності з демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття».

Загальний вигляд металевої ферми у проектному положенні наведено на рис. 6.7.

Металоконструкції ферми підсилення на покрівлі об'єкта «Укриття» розташовані на одній ділянці з трубопроводами модернізованої системи пилопригнічення та трапів на шляхах доступу до її вхідних форсунок. Тому для переходу через металоконструкції ферми до трапів модернізованої системи пилопригнічення закріпили спеціальні містки (рис. 6.8). У процесі стабілізації південної покрівлі об'єкта «Укриття» крім металевої ферми додатково змонтували повздовжні трапи шляхів доступу з поручнями, місточки для переходу через верхній або нижній пояс ферми, місточки для переходу через розкоси ферми.

У проекті демонтажу металевої ферми запропоновані технологічні рішення з виконання демонтажних робіт та комплекс заходів із забезпечення протирадіаційного захисту персоналу [171, 172].

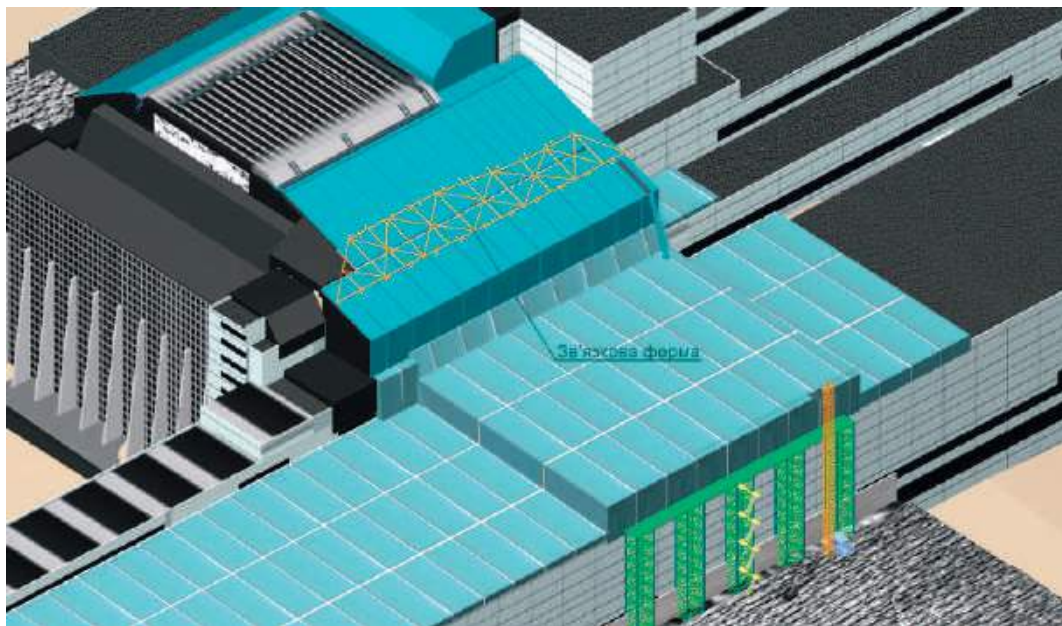


Рис. 6.6 — Металева ферма на південній покрівлі об'єкта «Укриття»



Рис. 6.7 — Металева ферма у проєктному положенні



Рис. 6.8 — Змонтована металева ферма з містками для переходу до трапів і форсунок модернізованої системи пилопригнічення



---

---

Демонтувати металеву ферму пропонується за допомогою систем НБК, зокрема СОК НБК та обладнання, яке дасть змогу здійснювати технологічні операції дистанційно, тобто з мінімальним залученням персоналу. Одним з головних технічних засобів демонтажу стане МІП СОК. МІП оснащена маніпулятором з радіусом дії 6,7 м. Маніпулятор може дистанційно замінювати навісні інструменти та обладнання для виконання технологічних операцій (ножиці по металу, дискова пилка, повітряно-плазмовий різак, обладнання для повітряно-плазмової різки).

Для організації безпечного доступу персоналу в зону демонтажу металевої ферми та тимчасового перебування там під час технологічних перерв у роботі передбачається облаштувати екрановану кабінку. Кабіна матиме спеціальний стропувальний вузол для незмінної орієнтації її відносно напрямку схід-захід та північ-південь, що сприятиме максимально ефективному використанню біологічного захисту від відомих джерел випромінювання об'єкта «Укриття».

Екранована кабіна буде обладнана ліхтарем напрямленого світла (на зовнішній поверхні) та блоком живлення (всередині), від якого через подовжувачі вмикатимуться електроінструменти і прилади додаткового освітлення в зонах виконання робіт (ЗВР). Кабіна підключатиметься до електроживлення від поворотного пристрою гака спеціального візка СОК, на якому буде підвішена кабіна.

Демонтаж металевої ферми здійснюватиметься в радіаційно небезпечних умовах об'єкта «Укриття». Радіаційну обстановку в ЗВР та на шляхах доступу вивчали на етапі передпроектних досліджень. За результатами проведених вимірювань створено картограму ПД  $\gamma$ -випромінювання на південній покрівлі об'єкта «Укриття» (рис. 6.9). За результатами проведених досліджень (рис. 6.10) встановлено, що загальне  $\beta$ -активне забруднення зовнішньої частини південних щитів і південних щитів-ключок змінюється в діапазоні від 4000 до 10 000 (см<sup>2</sup> · хв)<sup>-1</sup>; поверхневе радіоактивне забруднення, що знімається, становить 15—310  $\beta$ -частинок/(см<sup>2</sup> · хв) і до 3  $\alpha$ -частинок/(см<sup>2</sup> · хв).

Кутові розподіли інтенсивності  $\gamma$ -випромінювання на конкретних робочих місцях з демонтажу металевої ферми не досліджували. Основні напрямки  $\gamma$ -випромінювання, що формують потужність дози на робочих місцях, оцінювали за матеріалами раніше виконаних (під час реалізації проектів стабілізації будівельних конструкцій об'єкта «Укриття», будівництва НБК тощо) вимірювань за допомогою пристроїв ДКС-04К та ШД-1. Схема розташування та координати точок вимірювань кутових розподілів інтенсивності  $\gamma$ -випромінювання наведена на рис. 6.11, результати вимірювань у точках 1—8 — на рис. 6.12—6.13.

Отримані дані свідчать про те, що в ЗВР на майданчику тимчасового складування (точки 1—3) ПД формується здебільшого джерелами випромінювання, які розташовані в напрямку ЦЗ (у східному напрямку в горизонтальній площині та під кутом 45° вище лінії горизонту — центр контрфорсної стіни, а також у районі сходово-ліфтового блока).

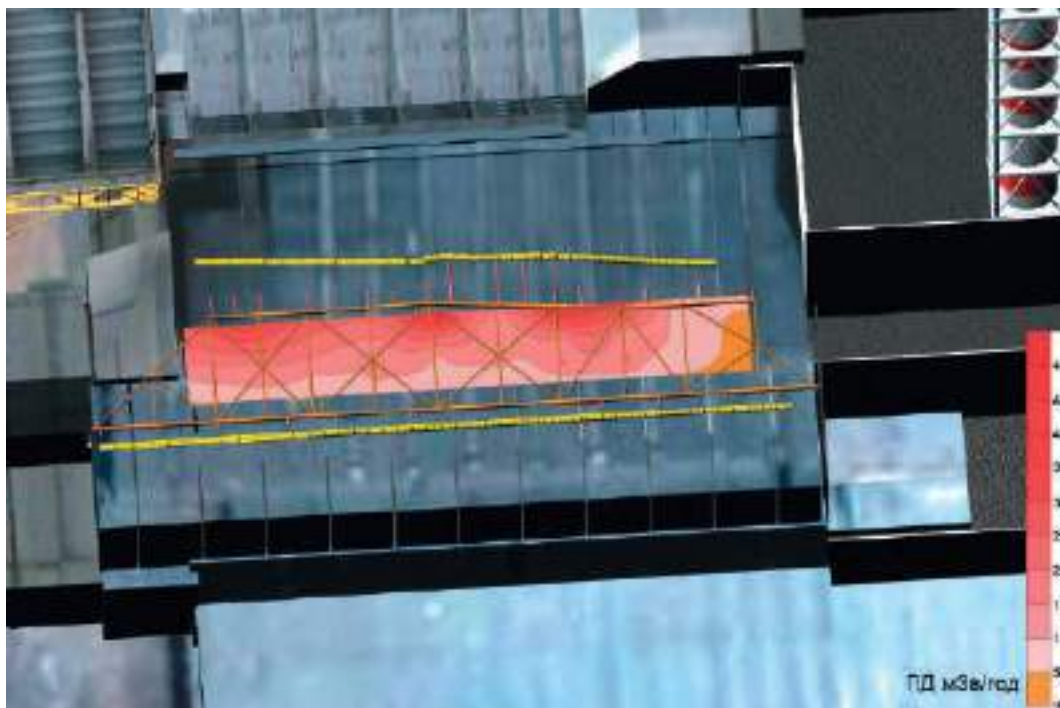


Рис. 6.9 — Картограма потужності дози  $\gamma$ -випромінювання в зоні виконання робіт



Рис. 6.10 — Вимірювання поверхневого радіоактивного забруднення:  
 а — вимірювання загального поверхневого радіоактивного забруднення;  
 б — відбір мазка з площі  $10 \text{ см}^2$



Номер точки	Координати
1	57/E+3
2	57+4/П
3	60+3/Л+3
4	54+120/E
5	54+120/E-30
6	65+1/A+35
7	65+2/Б+6
8	39-2/A+25
9	45/Б-2

Рис. 6.11 — Розташування точок вимірювань кутових розподілів  $\gamma$ -випромінювання

Результати вимірювань у точках 4—8 характеризують переважно основні напрямки, в яких формуються дози на шляхах доступу до ЗВР.

Кутові розподіли у ЗВР на південній покрівлі об'єкта «Укриття» визначали за результатами вимірювань у точці 9, отриманими під час досліджень до початку монтажу металевої ферми. Встановлено, що основні джерела  $\gamma$ -випромінювання розташовані в напрямку на північ (район басейнів витримки в ЦЗ) та, меншою мірою, на північний схід (місце розміщення джерел, що знаходяться під конструкцією «собачий дім»).

Одним з головних чинників радіаційного впливу на персонал і повітряне середовище у просторі під НБК будуть високі концентрації РА у повітрі внаслідок механічного впливу на поверхні забруднених конструкцій і обладнання. Отже, головним джерелом забруднення повітряного середовища і подальшого забруднення інших компонентів у просторі під НБК є поверхні приміщень і обладнання, забруднені радіоактивними речовинами під час робіт з використанням технологічного обладнання.

Зважаючи на особливу небезпеку робіт, пов'язаних з різанням забруднених металевих конструкцій, було запропоновано оцінювати їх внесок у концентрацію РА з припущенням, що в аерозольну форму перейде все поверхнєве забруднення з площі інтенсивного впливу у процесі різання і аерозоль рівномірно розподілиться між об'ємом робочої зони та об'ємом повітря, яке відкачується



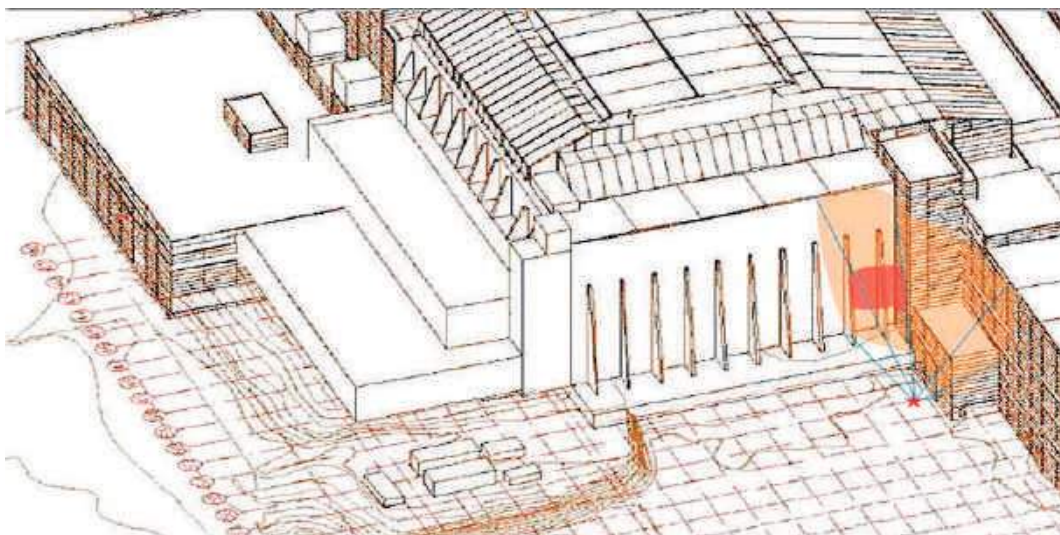


Рис. 6.12 — Напрямок на основні джерела випромінювання, що формують потужність дози у точці 1

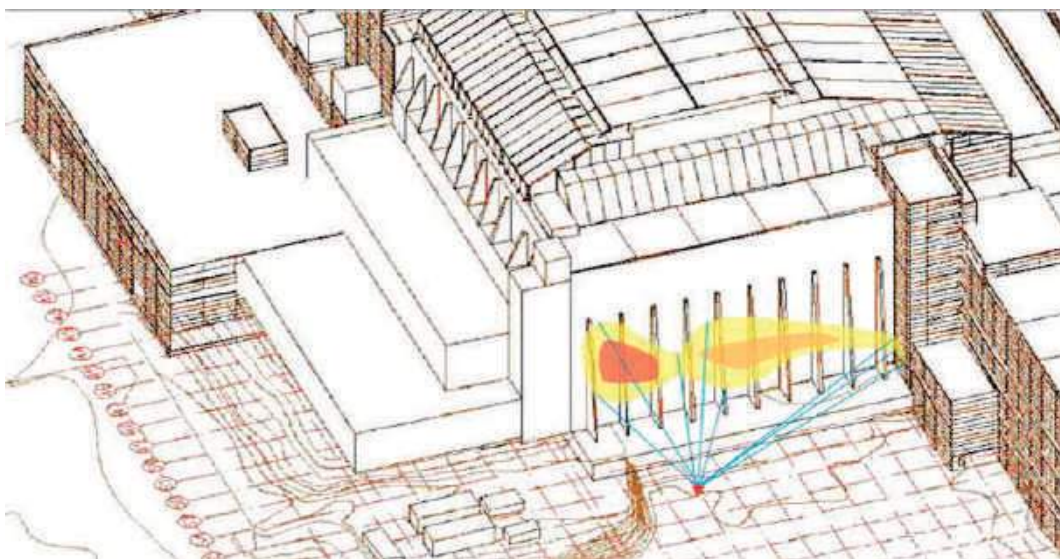


Рис. 6.13 — Напрямок на основні джерела випромінювання, що формують потужність дози у точці 2

---

---

системою вентиляції. Тоді концентрація РА у повітрі робочої зони під час проведення робіт, відповідно до запропонованого підходу, може бути обчислена за формулою

$$C = S \cdot d \cdot L / (V + qt),$$

де  $S$  — щільність поверхневого забруднення в місці проведення робіт з різання, Бк/м<sup>2</sup>;  $d$  — ширина зони інтенсивного нагріву (обробки), м;  $L$  — довжина шва, м;  $V$  — об'єм зони, в якій проводяться роботи, м<sup>3</sup>;  $q$  — потужність роботи витяжної вентиляційної системи НБК, м<sup>3</sup>/год;  $t$  — час роботи, год.

За результатами розрахунків [171], прогнозовану концентрацію РА в ЗВР при плазмовому різанні прийнято на рівні 1,23 Бк/м<sup>3</sup>, що значно нижче за контрольний рівень 9 Бк/м<sup>3</sup> для  $\beta$ -активних нуклідів [173]. Таке збільшення активності повітря за невеликий проміжок часу (часу проведення демонтажних робіт) не призведе до істотного погіршення радіаційного стану всередині арки НБК. Крім того, для зменшення утворення РА рекомендується дезактивувати місця різання.

Підкреслимо, що дослідження радіаційного стану в зоні демонтажу металевої ферми і на шляхах доступу виконувалися до встановлення НБК у проектне положення та закінчення облаштування майданчиків всередині НБК, тому до початку робіт з демонтажу як металевої ферми, так і інших нестабільних конструкцій треба провести нові дослідження з метою уточнення радіаційної обстановки.

Щоб забезпечити радіаційний захист персоналу, який виконуватиме демонтаж металевої ферми, розроблено й обґрунтовано комплекс організаційних, радіаційно-гігієнічних і технічних заходів. Організаційні заходи охоплюють підготовку персоналу, розробку конкретних процедур з організації безпечного виконання демонтажних робіт, постійний контроль за дотриманням вимог радіаційної та технічної безпеки. У заходах із забезпечення радіаційної безпеки враховано, що демонтажні роботи — це діяльність з відкритими джерелами іонізуючого випромінювання.

Радіаційно-гігієнічні та технічні заходи передбачають: дозиметричний і медичний контроль; застосування ЗІЗ; організацію санітарно-пропускну режиму; екранування; використання дистанційно керованого устаткування; дезактивацію і пилопригнічення; вентиляційний режим; забезпечення засобами особистої гігієни.

Використовуючи наявні дані про радіаційні умови у різних зонах об'єкта «Укриття», проаналізовано можливість екранування робочих місць та шляхів доступу для демонтажу металевої ферми. Аналіз технологічних рішень щодо демонтажу ферми, а також радіаційних умов на шляхах доступу та безпосередньо в ЗВР показав:

радіаційні умови в ЗВР та на шляхах доступу досить складні, значення величини ПД лежить в діапазоні від 40 до 39 000 мкЗв/год;



---

---

основний обсяг демонтажних робіт потребуватиме застосування безлюдних технологій за допомогою дистанційно керованого обладнання, встановленого на МІП СОК;

персонал, який безпосередньо демонтуватиме металеву ферму, матиме справу із значно меншим обсягом технологічних операцій порівняно з роботами, які здійснюються навісним обладнанням з дистанційним керуванням;

технологічні операції, які виконуватиме персонал на одному робочому місці, є короткочасними;

технологічні операції, які виконуватиме персонал вручну, мають здійснюватися за допомогою сучасного високопродуктивного обладнання (різка металоконструкцій) або пристроїв для швидкого монтажу і підключення (аварійне освітлення);

доставка матеріалів екранування, їх облаштування і переміщення від одного робочого місця до іншого потребуватимуть додаткових трудовитрат і, відповідно, призводитимуть до додаткових доз опромінення персоналу.

Враховуючи розпорошеність місць, де провадитимуться роботи, а також непослідовність виконання операцій вздовж верхнього та нижнього поясів ферми, прийнято рішення щодо недоцільності застосування захисних екранів у ЗВР. Натомість, з огляду на величини ПД на шляхах доступу, безпечна доставка персоналу до ЗВР з демонтажу металевої ферми є доцільною в екранованій кабіні, яка переміщуватиметься з майданчика тимчасового складування на південну покрівлю за допомогою СОК.

На майданчику тимчасового складування плануються фрагментація й уміщення фрагментів металевої ферми в транспортний контейнер — платформу для радіоактивно-забруднених металоконструкцій. До початку фрагментації за допомогою пінних аерозольних автономних засобів дезактивації оброблятимуться місця різання конструкцій ферми, що мінімізує утворення додаткових РАВ. Утворюватимуться лише вторинні тверді РАВ у незначній кількості, представлені обтиральними матеріалами, а рідких РАВ зовсім не буде.

Виконання робіт на майданчику тимчасового складування може спричинити радіоактивне забруднення його поверхонь. Тому після закінчення їх треба провести дозиметричне обстеження майданчика і прийняти рішення щодо його дезактивації.

Пилопригнічення (за потреби) здійснюватиметься двома способами:

розпиленням води або розчину для осадження пилу в зоні демонтажу металевої ферми на покрівлі об'єкта «Укриття» та на шляхах доступу;

нанесенням розчину на фрагменти демонтованої металевої ферми, уміщені в транспортний контейнер-платформу на майданчику тимчасового складування.

У проекті оцінено об'єми утворюваних твердих і рідких РАВ та характеристики їх. Розроблено транспортно-технологічні схеми поводження з різними видами РАВ. Прогнозна кількість твердих РАВ, які належатимуть до категорії низькоактивних РАВ, становить близько 275 кг або 1,3 м<sup>3</sup>. Прогнозна кількість рідких РАВ, які належатимуть

---

---

до категорії низькоактивних РАВ, така: від дезактивації забруднених додаткових ЗІЗ — приблизно  $0,2 \text{ м}^3$ ; від санобробки персоналу в СП-1430 — близько  $50 \text{ м}^3$ .

У результаті проведеного розрахунку отримані такі дані: трудовитрати на виконання робіт дорівнюватимуть  $486 \text{ люд.} \cdot \text{год}$ ; сумарна колективна ефективна доза —  $1,075 \text{ люд.} \cdot \text{Зв}$ , з яких  $0,12 \text{ люд.} \cdot \text{Зв}$  (близько  $0,1 \%$ ) припадає на інгалаційну складову (внутрішнє опромінення).

Запропоновані в проєкті заходи щодо впровадження безлюдних технологій виконання робіт та організації доставки персоналу до ЗВР в екранованій кабіні сприятимуть зменшенню колективної дози персоналу орієнтовно на  $1,5 \text{ люд.} \cdot \text{Зв}$ .

### **6.3 Реконструкція частин деаераторної етажерки та машинного залу**

Після спорудження огорожувального контуру НБК і насування арки у проєктне положення частина будівлі Чорнобильської АЕС, що входить до складу об'єкта «Укриття», залишилась поза межами НБК. Будівельні конструкції із західного та східного боків НБК, які не потрапили до його об'єму, отримали назву «виступаючі частини». Із західного боку НБК виступаючі частини (ВЧ) мають протяжність  $18 \text{ м}$  і охоплюють частину машинного залу і частину деаераторної етажерки (ДЕ). Із східного боку ВЧ мають протяжність  $30 \text{ м}$  і також охоплюють частину машинного залу і частину ДЕ. Схема розташування ВЧ об'єкта «Укриття» зображена на рис. 6.14.

У 2012—2013 роках провели спеціальні дослідження технічного стану будівельних конструкцій машинного залу і ДЕ та отримали дані для оцінки можливості безаварійного функціонування будівельних конструкцій ВЧ впродовж усього терміну експлуатації НБК (100 років). Розглянувши специфічні особливості основних несучих конструкцій, огорожувальних конструкцій та матеріалів покриттів будівель ВЧ, виконали розрахунки їх несучої спроможності з урахуванням факторів ослаблення за період експлуатації після аварії на Чорнобильській АЕС 1986 року.

На підставі отриманих даних визначено, що на вибір рішення про подальшу перспективу виступаючих частин об'єкта «Укриття» впливають, з одного боку, ризики, які потенційно можуть виникнути у разі неконтрольованого обвалення цих споруд, зокрема радіаційні наслідки і фінансові затрати на ліквідацію самої аварії, з іншого — ступінь залучення цих споруд до потреб поточної експлуатації системи НБК.

Загальний вигляд ВЧ об'єкта «Укриття» наведено на рис. 6.15 і 6.16.

Зазначимо, що нині багато приміщень ДЕ експлуатуються. На нижніх позначках західної частини ДЕ розташовані приміщення, в яких функціонує система поводження з рідкими радіоактивними відходами, експлуатуються приміщення саншлюза та сходово-ліфтовий блок, задіяний для організації шляхів доступу персоналу в приміщення об'єкта «Укриття», на покрівлю ДЕ і до машинного залу.





Рис. 6.15 — Виступаюча частина об'єкта «Укриття» із західного боку НБК



Рис. 6.16 — Виступаюча частина об'єкта «Укриття» із східного боку НБК



---

---

У більшості приміщень східної частини ДЕ прокладені магістральні кабельні лінії енергозабезпечення, експлуатуються трансформаторні підстанції, розташовані щити управління, зокрема щити системи інтегрованої автоматизованої системи контролю та системи фізичного захисту і контролю доступу. Через ДЕ проходять шляхи доступу в приміщення блока В, блока допоміжних систем реакторного відділення третього енергоблока Чорнобильської АЕС.

На відміну від ДЕ, у східній та західній частинах машинного залу приміщень, які експлуатуються, нема. Разом з тим виступаюча частина машинного залу на заході межує з експлуатованим компонентом НБК — шлюзом доступу пожежних підрозділів у південний сектор НБК. Будь-який інцидент, пов'язаний з аварією конструкцій західної ВЧ машинного залу, може призвести до довготривалого блокування проїзду під НБК, що само собою несе негативні наслідки. Крім того, в цій частині промислового майданчика НБК проходять надземні комунікації НБК на естакадах з високими і низькими опорами, які також можуть бути пошкоджені в разі непередбачуваного руйнування конструкцій ВЧ об'єкта «Укриття». І нарешті, поруч із західною ВЧ проходять шляхи доступу персоналу до входу в НБК, для якого в усіх випадках має гарантуватись безпека.

Отже, на підставі результатів досліджень технічного стану конструкцій і розрахунків було зроблено висновок про те, що виступаючі за межі НБК частини споруди Чорнобильської АЕС не відповідають вимогам, які висуваються до конструкцій НБК, а тому конструкції ВЧ треба підсилити або демонтувати.

Запропоновано такі варіанти реконструкції ВЧ з підсиленням та/або демонтажем несучих конструкцій для запобігання виникненню можливих аварій [174]:

підсилення з частковим демонтажем і заміною будівельних конструкцій із збереженням нинішніх позначок машинного залу і ДЕ (варіанти 1з і 1с);

підсилення з частковим демонтажем і заміною будівельних конструкцій із зміненням нинішніх позначок будівлі машинного залу (варіанти 2з і 2с).

За технологією варіанти 1з і 1с реконструкції ВЧ без змінення нинішніх позначок будівлі машинного залу і для західної, і для східної ВЧ укрупнено виглядають так:

демонтаж щитів додаткової металевої покрівлі ДЕ → демонтаж/підсилення плит покриття ДЕ, влаштування нової покрівлі → демонтаж/підсилення плит стінового огороження ДЕ → оздоблювальні роботи;

демонтаж щитів додаткової металевої покрівлі машинного залу → демонтаж/підсилення комплексних плит покриття машинного залу, влаштування нової покрівлі;

демонтаж/підсилення елементів каркасу машинного залу → демонтаж/підсилення панелей стінового огороження машинного залу → оздоблювальні роботи.

Технічний стан конструкцій східної ВЧ, як віддаленішої від епіцентра аварії, кращий за технічний стан аналогічних конструкцій західної ВЧ, тому для реконструкції за варіантом 1с характерніші роботи, пов'язані з підсиленням конструкцій без їх демонтажу.

---

---

За варіантами 2з і 2с реконструкція виступаючих частин ДЕ є аналогічною варіантам 1з і 1с, а змінення нинішніх позначок притаманне лише будівлі машинного залу, тому варіанти 2з і 2с розглядаються лише для машинного залу.

Роботи з реконструкції західної/східної ВЧ машинного залу йтимуть за такою послідовністю: демонтаж щитів додаткової металевої покрівлі, елементів стінового огородження, комплексних плит покриття і ферм → демонтаж елементів каркасу → монтаж ферм машинного залу на вкорочені частини колон → монтаж комплексних плит покриття, влаштування нової покрівлі → монтаж стінового огородження частини машинного залу, що залишилась → оздоблювальні роботи.

Загальний вигляд західної та східної ВЧ об'єкта «Укриття» після виконання робіт за одним з варіантів реконструкції зображено за допомогою комп'ютерної графіки на рис. 6.17 і 6.18.

Враховуючи складні радіаційні умови у приміщеннях об'єкта «Укриття», безпосередню близькість конструкцій ВЧ до споруди і до побудованої інфраструктури НБК, реконструкція виступаючих частин об'єкта «Укриття» є досить складним завданням, яке потягне за собою значні фізичні та фінансові витрати.

Варіанти реконструкції західної та східної частин машинного залу, які виступають за межі огорожувального контуру НБК, порівнюють на основі багатокритеріального підходу [175, 176] з урахуванням рекомендацій МКРЗ і вимог НРБУ-97. Суть методу полягає в побудові узагальненого показника ефективності рішення у вигляді суми окремих критеріїв з певними ваговими коефіцієнтами, що визначають важливість кожного з критеріїв для прийняття рішення. З цією метою для кожного окремого критерію будують функцію корисності  $u_j(x)$ , яка відображає область змінення кожного з критеріїв  $x$  у діапазоні від 0 до 1 [174, 177]. Для кожного варіанта визначають узагальнений показник корисності як суму відповідних функцій корисності

$$U_i = \sum_{j=1}^n k_j \cdot u_j(x_j)$$

з ваговими коефіцієнтами  $k_j$ , які вибирають так, щоб  $\sum_{j=1}^n k_j = 1$ .

Вид функцій корисності  $u_j$  і значення вагових коефіцієнтів  $k_j$  вибирають відповідно до теорії прийняття рішень при багатьох критеріях.

Для порівняння варіантів реконструкції західної та східної частин машинного залу, які виступають за межі огорожувального контуру НБК, взято такі критерії:  $C$  — вартість робіт;  $T$  — трудозатрати на виконання робіт;  $D$  — колективна ефективна доза опромінення персоналу;  $R$  — об'єми РАВ, що утворюються;  $L$  — вплив на діяльність з експлуатації комплексу НБК;  $Q$  — величина ризику потенційних аварій під час виконання робіт.



Рис. 6.17 — Виступаюча частина об'єкта «Укриття» із західного боку НБК після реконструкції, варіант 2з



Рис. 6.18 — Виступаюча частина об'єкта «Укриття» із східного боку НБК після реконструкції, варіант 2с

---

---

Відповідно до цих досліджень та розрахунків несучої спроможності конструкцій виступаючих частин об'єкта «Укриття», з урахуванням факторів ослаблення за період післяаварійної експлуатації, гарантій безаварійного функціонування будівельних конструкцій ВЧ впродовж всього терміну експлуатації НБК (100 років) дати не можна. Тому виступаючі за межі НБК частини споруди Чорнобильської АЕС не відповідають вимогам, які висуваються до конструкцій НБК, — їх треба або підсилювати, або демонтувати. Ця проблема потребує вирішення в короткостроковій перспективі.

На підставі результатів виконаного аналізу запропонованих варіантів для західної та східної ВЧ об'єкта «Укриття» без змінення або із зміненням проектних позначок машинного залу по узагальнених показниках корисності вибрані варіанти відрізняються несуттєво, тому їх можна вважати рівноцінними.

За результатами виконаної роботи прийнято Технічне рішення «Про вибір варіанта реконструкції частин деаераторної етажерки та машинного залу об'єкта «Укриття», що виступають за межі огорожувального контуру НБК», яке погоджене Державною інспекцією ядерного регулювання України. У Технічному рішенні намічено такий план дій:

- реконструкцію східної та західної частин ДЕ об'єкта «Укриття», що виступають за межі огорожувального контуру НБК, виконати підсиленням конструкцій;

- реконструкцію західної частини машинного залу об'єкта «Укриття», що виступає за межі огорожувального контуру НБК, виконати демонтажем конструкцій;

- місце зберігання демонтованих конструкцій західної частини машинного залу організувати в приміщеннях машинного залу об'єкта «Укриття» з подальшим облаштуванням нової покрівлі;

- реконструкцію східної частини машинного залу об'єкта «Укриття», що виступає за межі огорожувального контуру НБК, виконати підсиленням конструкцій.

#### **6.4 Аналіз потенційних стратегій перетворення об'єкта «Укриття»**

Практично відразу ж після закінчення будівництва об'єкта «Укриття» і прийняття його на технічне обслуговування було зрозуміло, що питання безпеки об'єкта вирішено тільки на короткострокову перспективу. Актуальною стала проблема, куди і як рухатися далі.

Різні ідеї щодо перетворення об'єкта «Укриття» пропонувалися починаючи з 1989 року: передусім — у складі техніко-економічного обґрунтування «Укриття-2», виконаного Всеросійським проектним і науково-дослідним інститутом комплексної енергетичної технології, а пізніше — в рамках міжнародного конкурсу «Київ-92», на який надійшло 394 пропозиції [3]. Згодом варіанти перетворення об'єкта «Укриття» опрацьовувала група «Альянс», потім вони вивчались у складі завдань ПЗЗ ОУ.

Зараз практична діяльність з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему провадиться відповідно до вимог Закону України «Про загальні засади



---

подальшої експлуатації і зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблока цієї АЕС на екологічно безпечну систему» [11], Закону України «Про Загальнодержавну програму зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему» [141] та «Стратегії перетворення об'єкта «Укриття»» [142]. Головними результатом цієї діяльності стали стабілізація будівельних конструкцій об'єкта «Укриття», будівництво та введення в дослідно-промислову експлуатацію НБК.

Створення НБК є надзвичайно важливим етапом реалізації стратегії перетворення об'єкта «Укриття», проте це не означає, що після введення в експлуатацію НБК проблема об'єкта «Укриття» вже остаточно розв'язана. Щоб перетворити об'єкт «Укриття» на екологічно безпечну систему, потрібно вжити ще багато наукових та технічних заходів для досягнення кінцевої мети — переведення в контрольований стан ПВМ [8]. Скупчення ПВМ, що утворилися внаслідок запроектої аварії на четвертому енергоблоці, і надалі лишатимуться джерелом небезпеки об'єкта «Укриття». За своїм станом і складом ПВМ є довгоіснуючими РАВ, а деякі скупчення ПВМ є ядерно небезпечними. Тому, якщо ПВМ залишатимуться всередині об'єкта «Укриття» у неконтрольованому стані, його взагалі ніколи не можна бути звільнити від ядерного регулювання та контролю.

Вилучення ПВМ на сьогодні є умовою перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему та зняття його з експлуатації. Перехід до зняття з експлуатації об'єкта «Укриття» може вважатися закінченим лише тоді, коли ПВМ будуть переведені в ядерно безпечний стан та поставлені на контрольоване зберігання або передані на захоронення у стабільних геологічних формаціях.

Згідно зі «Стратегією перетворення об'єкта «Укриття»» [142] роботи із вилучення ПВМ мають бути здійснені на кінцевому третьому етапі перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему.

У рамках ПЗЗ ОУ шляхи розв'язання проблеми вилучення ПВМ та подальшого поводження з ними розглядались у завданнях «Вивчення і розробка стратегії вилучення ПВМ і поводження з РАВ» і «Розробка технології вилучення ПВМ». За результатами виконання цих завдань у грудні 2000 року було прийнято програмне рішення [178], в якому визначено попередню стратегію вилучення ПВМ і поводження з РАВ. Основні положення цієї стратегії такі:

- вилучити ПВМ протягом терміну служби НБК;
- тривалість вилучення — 40...50 років;
- вважати пріоритетним переміщення ПВМ та інших довгоіснуючих РАВ безпосередньо у сховище для остаточного захоронення в стабільних геологічних формаціях;
- розпочати вибіркове вилучення ПВМ після демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» і закінчення випробовування технологій вилучення ПВМ;
- приступити до масового вилучення ПВМ після розв'язання питань зберігання або захоронення їх.

---

---

Рішення [178] розглядалось як попереднє, за умови його підтвердження результатами демонстраційного експерименту з вилучення ПВМ, що зафіксовано в програмному рішенні [179], прийнятому 2001 року. Але в прийнятому 2005 року документі «Стратегія поводження з ПВМ і радіоактивними відходами об'єкта «Укриття». План подальших дій» [180], погодженому Держатомрегулювання України, говориться:

на поточний момент відсутні будь-які нові дані про застосування нових технологій для вилучення ПВМ, на підставі яких можна на концептуальному рівні переглянути попередню стратегію вилучення ПВМ, тому продовження концептуального дослідження стратегії та технологій вилучення ПВМ не є доцільним;

на нинішньому етапі реалізації ПЗЗ ОУ не отримано додаткової інформації щодо ПВМ, яка б дозволила прийняти рішення про їх раннє вилучення; наявна інформація про довгострокову поведінку ПВМ вказує на потребу в розробленні програми моніторингу та контролю стану ПВМ до і під час робіт з їх вилучення;

детальне проектування і демонстрація прототипу технології вилучення ПВМ є недоцільними з урахуванням їх вартості та графіка.

Водночас документ [180] дає програму дій для досягнення ключового рішення у такий спосіб:

на період до прийняття ключового програмного рішення у ході реалізації будівельних робіт із стабілізації будівельних конструкцій об'єкта «Укриття», спорудження НБК та раннього демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» поводження з РАВ, зокрема з ПВМ, визначатиметься в рамках «Інтегрованої програми поводження з радіоактивними відходами на етапі припинення експлуатації Чорнобильської АЕС і перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему»;

за результатами виконання завдань ПЗЗ ОУ будуть отримані вихідні дані для розробки та встановлення системи контролю поведінки ПВМ і для створення систем, що забезпечують підтримання оптимальних температури і вологості для зберігання ПВМ всередині об'єкта «Укриття»; це уможливить одержання оперативної інформації про негативні тенденції поведінки ПВМ;

прогнозна модель поведінки ПВМ, а також дані, отримані за допомогою системи контролю поведінки ПВМ і системи контролю ядерної безпеки, дадуть змогу своєчасно реалізувати превентивні заходи, спрямовані на зниження ризику несприятливих наслідків погіршення стану ПВМ, а також прийняти рішення щодо раннього вилучення ПВМ; на основі прогнозної моделі й результатів контролю ПВМ стратегія вилучення ПВМ і поводження з РАВ буде доопрацьована.

Особливість нинішньої ситуації полягає в тому, що розроблення сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» має враховувати конструктивні, об'ємно-планувальні та технологічні рішення НБК. Прийняті рішення стосовно НБК значною мірою відповідають вимогам, викладеним у Законі України «Про загальні засади подальшої

---

---

експлуатації і зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблока цієї АЕС на екологічно безпечну систему» [11], де, нагадаємо ще раз, сказано: «конфайнмент — захисна споруда, що включає в себе комплекс технологічного обладнання для вилучення із зруйнованого четвертого енергоблока Чорнобильської АЕС матеріалів, які містять ядерне паливо, поводження з радіоактивними відходами та інші системи, призначена для здійснення діяльності з перетворення цього енергоблока на екологічно безпечну систему та забезпечення безпеки персоналу, населення і довкілля». Втім НБК будувався в умовах відсутності чіткої стратегії майбутнього вилучення і подальшого поводження з ПВМ. Основною вимогою до НБК було резервування технологічного простору, щоб розміщувати й використовувати технологічне обладнання для вилучення ПВМ й подальшого поводження з ним. Проте в цілому НБК створює базис для діяльності з вилучення ПВМ (захисна споруда НБК, система основних кранів, системи вентиляції та енергопостачання, інші технологічні системи).

Потенційна небезпека ПВМ з часом може зростати внаслідок спонтанного руйнування поверхні ЛПВМ з утворенням високоактивного пилу, набувши не тільки локального, а й глобального характеру. Тому надзвичайно актуальними є вилучення і кондиціонування ПВМ до того, як процес їх руйнування набуде масштабного характеру [65].

Підкреслимо, що обов'язковою умовою безпечного зберігання відпрацьованого ядерного палива є створення кількох герметичних бар'єрів для запобігання впливу на довкілля. НБК не є герметичною спорудою, тому ризики впливу залишків ядерного палива четвертого енергоблока на довкілля зберігатимуться, допоки воно не буде вилучене з об'єкта «Укриття».

Повторимо, створення НБК проблему перетворення об'єкта «Укриття» повністю не вирішує. Гарантований термін експлуатації НБК становить всього 100 років, а періоди напіврозпаду ядерних матеріалів, що містяться в ньому, на багато порядків більші; отже, небезпека для довкілля зберігатиметься не одне тисячоліття. Якщо не займатися цією проблемою, то її розв'язання буде перекладено на майбутні покоління. Тому вкрай важливими є розробка та обґрунтування стратегічних напрямів діяльності з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему відразу ж після введення в експлуатацію НБК.

Питання вилучення ПВМ з об'єкта «Укриття» та подальшого поводження з ними вивчалися в різних аспектах [30, 168, 181—191]. На цей час розглядаються три основні стратегії перетворення об'єкта «Укриття»:

- захоронення на місці заповненням бетоном або іншими сумішами;
- тимчасова ізоляція з намірами відкладеного вилучення ПВМ;
- поетапне вилучення ПВМ.

Проаналізуємо переваги та недоліки кожної з них.

---

---

*Варіант «захоронення на місці»* (рис. 6.19) має найдавнішу історію, пропонувався у різних версіях ще задовго до прийняття рішення стосовно будівництва НБК. На перший погляд такий сценарій видається прийнятним для порівняно швидкого вирішення проблеми перетворення об'єкта «Укриття». Але тільки на перший погляд. Цьому сценарію властиві недоліки як з будівельної точки зору, так і невідповідність вимогам ядерної, радіаційної та екологічної безпеки, зокрема:

заповнення бетоном приміщень об'єкта «Укриття» призведе до суттєвого перевантаження й осідання ґрунтової основи, а отже, до значних деформацій як пошкоджених конструкцій четвертого енергоблока, так і суміжних конструкцій третього енергоблока, з можливим руйнуванням їх; це негативно вплине на стан конструкцій, які виконують функцію огорожувального контуру НБК, а також на фундаменти НБК (рис. 6.20), і може знизити показники експлуатаційної надійності НБК (зокрема, унеможливити експлуатацію основних кранів), а в найгіршому випадку — до руйнування арки НБК;

бетонування скупчень ПВМ унеможливорює надійний контроль стану ядерних матеріалів, що не відповідає вимогам із забезпечення ядерної безпеки;

навіть у разі успішної реалізації варіанта «захоронення на місці» проблема безпеки об'єкта «Укриття» може бути вирішена тільки у короткостроковій перспективі; така споруда не є довговічною навіть за умови якісного бетонування приміщень, що практично є недосяжним в умовах об'єкта «Укриття»;

захоронення на місці не можна розглядати як кінцевий стан екологічно безпечної системи об'єкта «Укриття», оскільки цей варіант не забезпечує надійної ізоляції ПВМ та інших довгоіснуючих РАВ на весь період їх небезпеки для довкілля і в жодному разі не відповідає вимогам нормативно-правових актів у сфері радіаційної та екологічної безпеки;

крім того, виникає цілком логічне запитання: навіщо було створювати надзвичайно дорогий НБК, якщо бетонування приміщень об'єкта «Укриття» можна було виконати і без нього?

*Варіант «тимчасова ізоляція»* також передбачає заповнення приміщень об'єкта «Укриття» бетоном або іншими сумішами, але значно в меншому обсязі зважаючи на потребу забезпечити ізоляцію ПВМ на певний проміжок часу. Порівняно з варіантом «захоронення на місці», варіант «тимчасова ізоляція» має на увазі тільки створення додаткових бар'єрів навколо скупчень ПВМ та їх вилучення надалі (рис. 6.21). Це той самий варіант відкладеного вирішення проблем об'єкта «Укриття» з обтяжуючими обставинами, зумовленими створенням додаткових труднощів у майбутній діяльності (суттєво збільшуються складність і масштаби робіт з розбирання об'єкта «Укриття» після його бетонування, відповідно збільшуються об'єми утворюваних РАВ тощо).



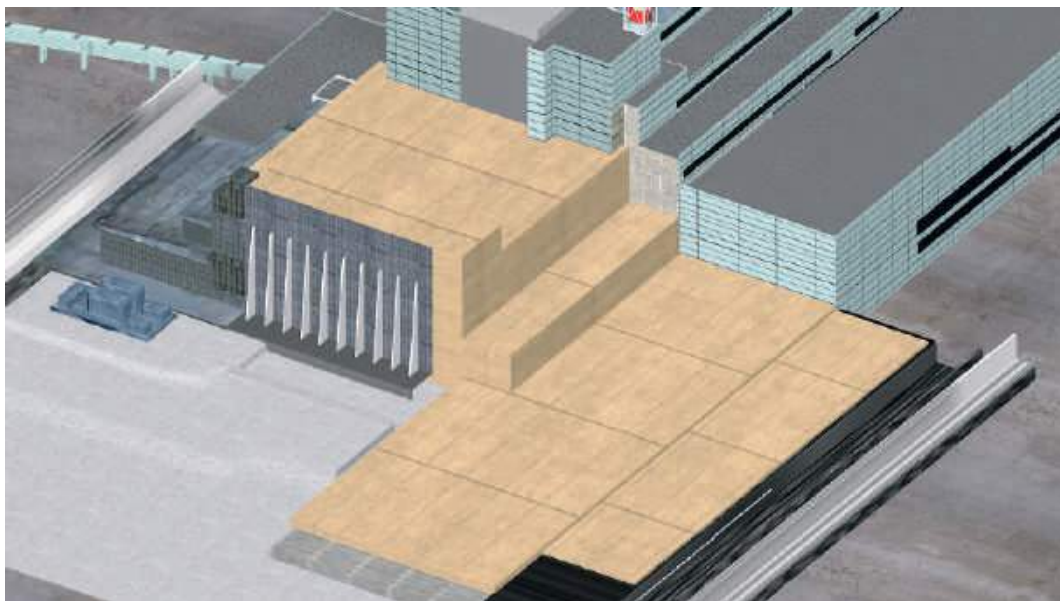


Рис. 6.19 — Варіант «захоронення на місці»

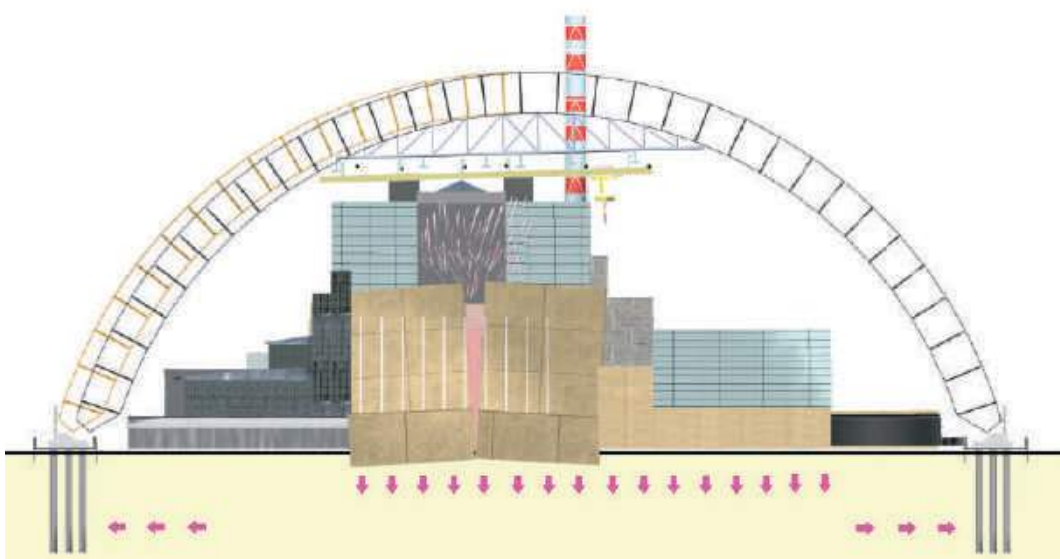


Рис. 6.20 — Перевантаження й осідання ґрунтової основи



Рис. 6.21 — Варіант «тимчасова ізоляція»

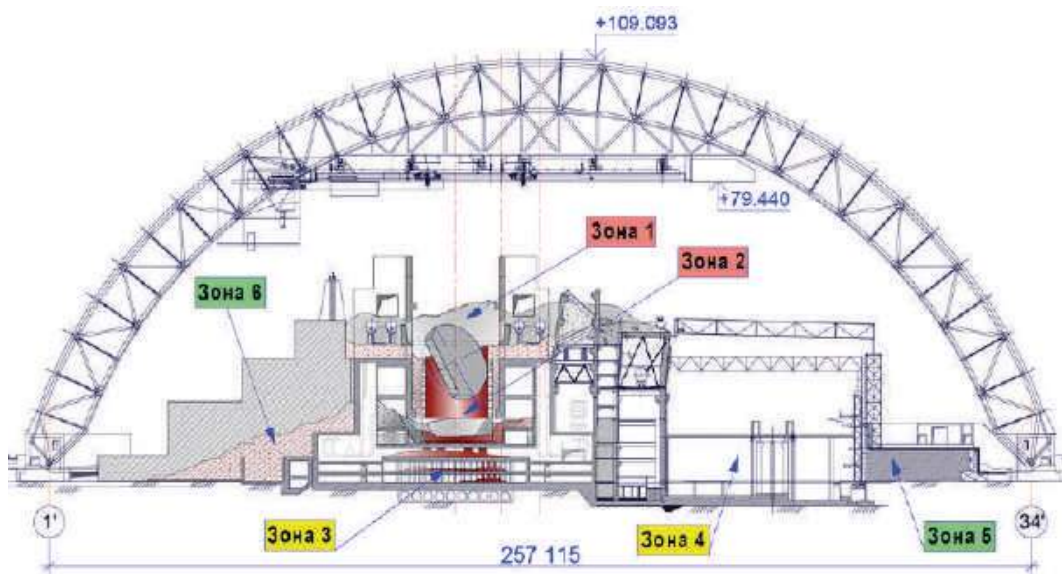


Рис. 6.22 — Зони вилучення паливовмісних матеріалів

---

*Варіант «поетапне вилучення»* передбачає першочергове вилучення найнебезпечніших скупчень ПВМ протягом життєвого циклу НБК. Частина менш небезпечних ПВМ може бути вилучена як протягом життєвого циклу НБК, так і після його зняття з експлуатації. З огляду на відповідність вимогам з ядерної, радіаційної, екологічної та загальнопромислової безпеки, а також зважаючи на можливість практичної реалізації (враховуючи наявність НБК), стратегія «поетапне вилучення» має суттєві переваги і надалі розглядається як пріоритетна.

На вибір порядку та конкретних технологічних рішень щодо вилучення кожного із скупчень ПВМ впливають як характеристики ПВМ, так і зони їх розташування, або *зони вилучення ПВМ*.

Виходячи з наявної інформації про розташування ПВМ, можна виділити сім специфічних зон їх вилучення в майбутньому з використанням різних технологій (рис. 6.22):

- 1 — верхні позначки об'єкта «Укриття» (центральный зал, басейни витримки, інші приміщення вище за позначку 18.000);
- 2 — проміжні позначки об'єкта «Укриття» (підапаратне приміщення, інші приміщення на позначках від 9.000 до 18.000);
- 3 — нижні позначки об'єкта «Укриття» (паророзподільний коридор, басейн-барботер, інші приміщення нижче за позначку 9.000);
- 4 — частина машинного залу в межах об'єкта «Укриття»;
- 5 — простір за піонерними стінами;
- 6 — завали під каскадної стіною;
- 7 — локальна зона об'єкта «Укриття».

Наведемо основні чинники, які обов'язково треба враховувати в процесі планування вилучення ПВМ із зон.

Зона 1: 1) велика кількість паливовмісних матеріалів, за сучасними оцінками — в межах від 30 до 115 т (U); 2) складна радіаційна обстановка (потужність дози сягає 1000 Р/год у ЦЗ і 2000 Р/год на дні південного басейну витримки); 3) наявність великої кількості паливного пилю, що потребує розроблення низки заходів, спрямованих на неперевикнення допустимих концентрацій радіонуклідів всередині НБК, допустимих викидів з НБК, допустимих рівнів забруднення його конструкцій і обладнання в процесі виконання робіт; 4) наявність ядерно небезпечних скупчень ПВМ; 5) наявність масивних конструкцій (схема «Е», розвантажувально-завантажувальна машина тощо), які неможливо видалити цілком і які потребують застосування спеціальних дистанційно керованих агрегатів для їх фрагментації; 6) наявність великих завалів, під якими є ПВМ з невідомими характеристиками та кількістю, потреба у застосуванні спеціальних технологій під час розбирання їх; 7) наявність графіту, що потребує використання спеціальних технологій поводження з ним.

---

Зони 2 і 3: 1) оточення зон численними будівельними конструкціями зруйнованого четвертого енергоблока, що виконують функцію інженерних бар'єрів на шляху виходу радіоактивних речовин та іонізуючого випромінювання, а тому значно менший радіаційний вплив на довкілля і майбутній персонал НБК порівняно із зоною 1; 2) наявність таких бар'єрів суттєво ускладнює виконання робіт з вилучення ПВМ у цих зонах зважаючи на потребу демонтажу окремих будівельних конструкцій четвертого енергоблока для організації доступу до скупчень ПВМ); 3) велика кількість ПВМ; за сучасними оцінками, у зоні 2 міститься приблизно  $90 \pm 35$  т (U), у зоні 3 —  $22 \pm 8$  т (U); 4) складна радіаційна обстановка (потужність дози сягає 1000 Р/год); 5) наявність ядерно небезпечних скупчень ПВМ; 6) різноманітна структура ПВМ, що представлена ФАЗ, ЛПВМ (коричневі, чорні, поліхромні), паливним пилом та іншими модифікаціями ПВМ; частина ПВМ дифундувала в бетон на значну глибину, що створить додаткові труднощі під час їх видалення; значна кількість ПВМ залита бетоном у процесі будівництва об'єкта «Укриття».

Зона 4: наявність лише окремих невеликих фрагментів ПВМ, кількість і характеристики яких потрібно встановити в процесі спеціальних досліджень.

Зона 5: 1) наявність близько 1700 контейнерів (об'ємом 1 м<sup>3</sup> кожен) з ВАВ, які розміщені за піонерною стіною під товщею бетону; 2) розташування зони поза межами дії основних кранів НБК; 3) наявність у зоні майданчика тимчасового зберігання демонтованих конструкцій об'єкта «Укриття»; 4) використання частини зони для доступу пожежних машин всередину арки НБК.

Зона 6: 1) наявність ПВМ у завалі під каскадною стіною (рис. 6.23), кількість яких, за оцінками, становить від 0,7 до 1,2 т, з переважною зосередженістю в південно-східній частині завалу; 2) розташування зони поза межами дії основних кранів НБК.

Зона 7: 1) вміст ПВМ у техногенному ґрунті локальної зони об'єкта «Укриття» під спорудами НБК (західна стіна арки НБК, технологічна будівля, допоміжні споруди); 2) часткове вилучення цих ПВМ у процесі виконання земляних робіт для влаштування фундаментів споруд НБК.

*Вилучення ПВМ із зони 1* є першочерговим завданням, спрямованим на підвищення рівня безпеки під час експлуатації НБК. ПВМ цієї зони загалом формують радіаційну обстановку всередині НБК і на прилеглий території. Треба брати до уваги, що після демонтажу трубного накату та легкої покрівлі ПЕД в зонах обслуговування НБК збільшиться майже втричі [146]. Радіоактивний пил у цій зоні буде основним джерелом забруднення конструкцій арки й устаткування НБК як у режимі нормальної експлуатації, так і в разі можливих аварій. Цей ефект посилиться, коли в результаті демонтажу нестабільних конструкцій розкриється верхня частина об'єкта «Укриття», тобто зникне бар'єр на шляху виходу радіоактивних речовин у простір НБК. Вилучення ПВМ із зони 1 у принципі неможливе без використання систем НБК і має закінчитися протягом життєвого циклу НБК.



---

*Вилучення ПВМ із зони 2 у разі організації робіт за схемою вертикального доступу «зверху-вниз» можливе тільки після вилучення ПВМ із зони 1, зокрема після вилучення схеми «Е» та організації доступу в прим. 305/2 через шахту реактора.*

*Вилучення ПВМ із зони 3 можливе, відповідно, після вилучення ПВМ із зони 2. Проте в разі прискореної деградації ЛПВМ треба передбачити можливість вилучення ПВМ із зони 2 і зони 3 паралельно з вилученням ПВМ із зони 1, організувавши альтернативний доступ до цих скупчень. Пріоритетним є вилучення ПВМ із зони 2.*

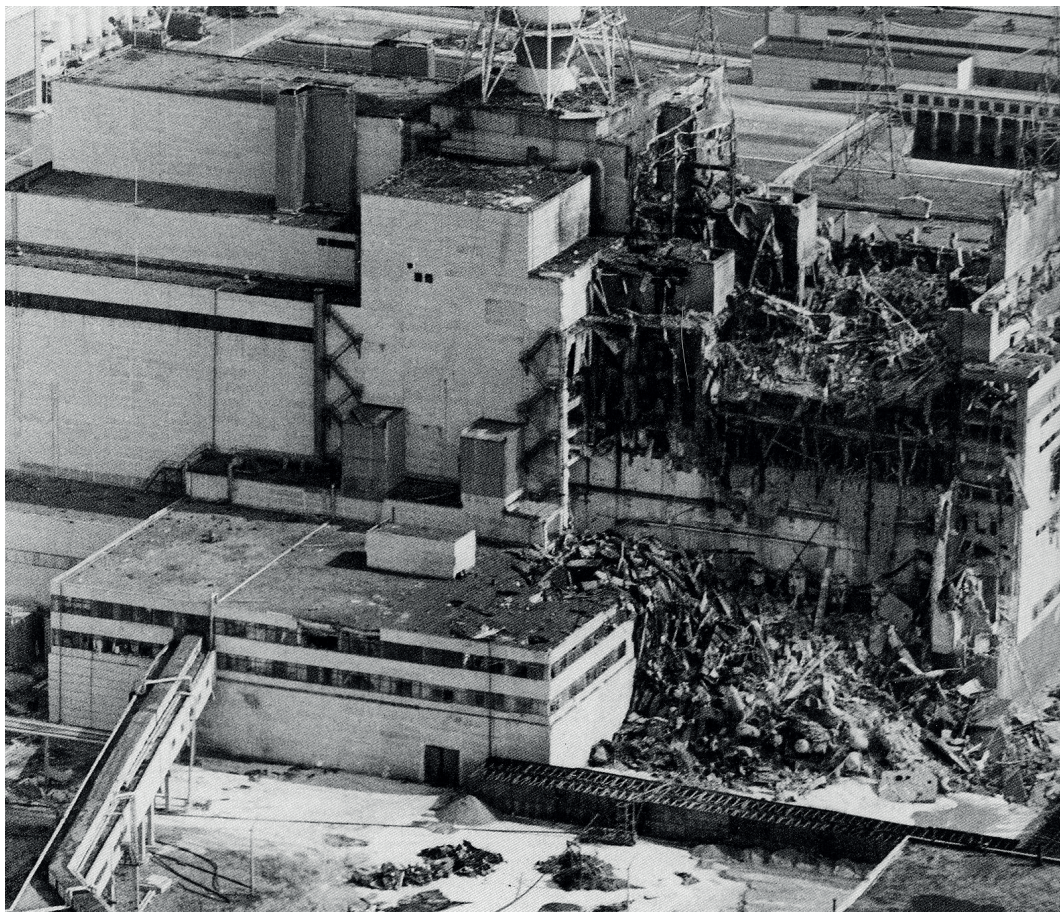


Рис. 6.23 — Паливовмісні матеріали у завалі під каскадною стіною  
(до спорудження каскадної стіни)

---

---

Якщо з якихось причин не вдасться протягом життєвого циклу НБК вилучити окремі скупчення ПВМ зони 3, зокрема з басейну-барботера, можлива їх консервація на період до 300 років зважаючи на задовільний стан будівельних конструкцій і ефективне виконання ними функції інженерного бар'єра.

*Вилучення ПВМ із зони 4* через розташування її поза межами дії основних кранів НБК може здійснюватися з використанням інших механізмів без прив'язки до робіт в інших зонах. Це завдання не є пріоритетним, проте є бажаним на початковому етапі експлуатації НБК зважаючи на те, що надійність конструкцій покриття машинного залу з часом знижуватиметься і, відповідно, зростатимуть ризики їх обвалення. У разі потенційного обвалення конструкцій покриття машинного залу діяльність із вилучення ПВМ ускладниться.

*Вилучення ПВМ із зони 5*, як і із зони 4, через розташування її поза межами дії основних кранів НБК може здійснюватися з використанням інших механізмів без прив'язки до робіт в інших зонах. Це завдання не є пріоритетним, воно потенційно можливе після зняття з експлуатації арки НБК.

*Вилучення ПВМ із зони 6*, так само, як із зон 4 і 5, може здійснюватися з використанням інших механізмів та без прив'язки до робіт в інших зонах. Проведення робіт в зоні 6 можливе на кінцевому етапі експлуатації арки НБК.

*Вилучення ПВМ із зони 7* можливе тільки після зняття з експлуатації НБК, оскільки ці матеріали містяться в техногенному ґрунті локальної зони об'єкта «Укриття» під спорудами НБК (західна стіна арки НБК, технологічна будівля, допоміжні споруди).

Отже, з огляду на найбільшу радіаційну та ядерну небезпеку скупчень ПВМ, що містяться в зонах 1 і 2, діяльність з їх вилучення є *пріоритетною* і має бути закінчена протягом життєвого циклу НБК.

В зонах 3—6 відсутні ядерно небезпечні скупчення ПВМ, їх вплив на стан радіаційної безпеки об'єкта «Укриття» набагато менший. Вилучення ПВМ з них є можливим у будь-який період експлуатації НБК за умови, що цей процес не перешкоджатиме вилученню ПВМ із зон 1 і 2. Окремі найменш небезпечні скупчення ПВМ можуть бути вилучені після зняття з експлуатації НБК. Що стосується вилучення ПВМ із зони 7, то воно можливе тільки після зняття з експлуатації НБК; ці скупчення також можуть бути захороненні на місці після відповідного обґрунтування безпеки.

Діяльність з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему на основі впровадження стратегії «поетапне вилучення ПВМ» може реалізовуватись потенційними сценаріями, які наведені в табл. 6.3.

Сценарій 1, за яким ПВМ вилучатимуть із зон 1—6 протягом життєвого циклу НБК, а із зони 7 — після зняття з експлуатації НБК, є найамбітнішим. Проте треба розглядати й інші сценарії зважаючи на реальні можливості провадження такої масштабної й складної діяльності, як вилучення ПВМ та подальше поводження

з ними. Зазначимо, що ступінь вилучення ПБМ залежить від вибору й обґрунтування кінцевого стану об'єкта «Укриття». Одним з можливих варіантів є перетворення об'єкта «Укриття» на сховище короткоіснуючих і обмеженої кількості довгоіснуючих РАВ, вилучення яких пов'язано зі значними складнощами. При цьому допустима кількість довгоіснуючих РАВ визначається за результатами оцінки безпеки такого сховища з урахуванням його розміщення в зоні спеціального промислового використання, не придатній для проживання населення.

**Таблиця 6.3 — Потенційні сценарії реалізації стратегії  
«Поетапне вилучення паливовмісних матеріалів»**

Номер сценарію	Вилучення протягом життєвого циклу НБК	Відкладене вилучення після зняття з експлуатації НБК	Захоронення на місці
1	Зони 1—6	Зона 7	—
2	Зони 1, 2, 3, 4, 6	Зони 5, 7	—
3	Зони 1, 2, 3, 4, 6	Зона 5	Зона 7
4	Зони 1, 2, 3 (ПРК), 4, 6	Зони 3 (ББ), 5	Зона 7
5	Зони 1, 2, 3 (ПРК), 4	Зони 3 (ББ), 5, 6	Зона 7
6	Зони 1, 2, 3 (ПРК)	Зони 3 (ББ), 4, 5, 6	Зона 7
7	Зони 1, 2, 3 (ПРК)	Зони 3 (ББ), 5, 6	Зони 4, 7
8	Зони 1, 2, 3 (ПРК)	Зони 3 (ББ), 6	Зони 4, 5, 7
9	Зони 1, 2	Зона 3	Зони 4, 5, 6, 7
10	Зони 1, 2	Зона 3 (ПРК)	Зони 3 (ББ), 4, 5, 6, 7

Кожен із запропонованих сценаріїв передбачає обов'язкове вилучення ПБМ із зон 1 і 2 протягом життєвого циклу НБК.

Відкладене вилучення окремих скупчень ПБМ після зняття з експлуатації НБК (тобто через 100 років і більше) або їх захоронення на місці можливі з кількох причин:

ці скупчення ядерно безпечні, їх внесок у радіаційний стан за межами зон їх локалізації є мінімальним;

скупчення ПБМ у зоні 3 оточені масивними конструкціями; наявні дані про стан масивних конструкцій четвертого енергоблока свідчать про відсутність їх суттєвих ушкоджень за винятком місцевих деструктивних руйнувань верхнього шару бетону перекриття під прим. 305/2 внаслідок високотемпературного впливу і тріщин в одній із стін приміщення. Це пояснюється тим, що конструктивне рішення будівлі реакторного відділення виконано у вигляді жорсткої об'ємно-просторової структури



---

---

з монолітного залізобетону. Приміщення, що розташовані у зоні 3, утворюють систему герметичних приміщень — міцно-щільних боксів з несучими конструкціями, здатними витримати високі навантаження, тому потреба в їх підсиленні є малоімовірною;

внаслідок виведення з експлуатації ставка-охолоджувача рівень підземних вод на майданчику НБК знизився, що позитивно вплинуло на безпеку скупчень ПВМ у зонах 5, 6 і 7 (відстань від низу цих скупчень до рівня підземних вод перевищує 4 м).

Зважаючи на місцеві деструктивні руйнування верхнього шару бетону перекриття під прим. 305/2, що одночасно є перекриттям над паророзподільним коридором, а також з огляду на значну кількість ПВМ у ПРК, що належить до зони 3, їх вилучення треба вважати пріоритетним порівняно із зонами 3 (ББ), 4, 5, 6 і 7.

Відповідно до попередніх оцінок, з переліку сценаріїв 1—10 за сукупністю критеріїв порівняння (відповідність вимогам нормативних документів, витрати на реалізацію, вплив на довкілля, строки реалізації, надійність захисних бар'єрів) найкращим є сценарій 6. Проте остаточний висновок щодо цього можна буде зробити після детального опрацювання наведених та, можливо, інших сценаріїв і порівняння їх на основі багатокритеріального аналізу. Така робота наразі виконується.

Отже, розглянуті в табл. 6.1 сценарії передбачають обов'язкове вилучення ПВМ із зон 1 і 2 протягом життєвого циклу НБК; щодо скупчень ПВМ у зоні 3, то їх вилучення може відбуватися і після зняття з експлуатації НБК. Проте все ж таки кращим треба вважати сценарій, коли скупчення ПВМ у зоні 3 будуть вилучені протягом життєвого циклу НБК, особливо це стосується ПВМ у паророзподільному коридорі.

Розглянемо особливості вилучення ПВМ з кожної зони.

**Вилучення ПВМ із зони 1.** Вилучення ПВМ із зони 1 може розпочатися тільки після демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття». Демонтаж нестабільних конструкцій покриття над реакторним блоком забезпечить доступ зверху до скупчень ПВМ з використанням СОК.

Роботи з вилучення ПВМ мають проводитись дистанційно, за відсутності персоналу безпосередньо в зоні виконання робіт, щоб унеможливити отримання значних індивідуальних та колективних доз у нормальному режимі проведення робіт та в разі можливих аварій, із застосуванням комплексного підходу з використанням СОК і дистанційно керованих агрегатів (ДКА).

Насамперед треба вилучити ПВМ в районі верхніх позначок об'єкта «Укриття», тобто ПВМ, що найбільше впливають на радіаційну обстановку всередині арки НБК (ходові площадки вузла розвішування свіжого палива, покрівлі приміщень барабан-сепараторів, район центрального залу біля басейну витримки тощо), а також масивні конструкції та обладнання ЦЗ (розвантажувально-завантажувальна машина, мостовий кран).

---

---

У процесі проведення робіт треба періодично проводити радіаційну розвідку, зокрема з використанням  $\gamma$ -візора, щоб виявити найбільш радіаційно небезпечні ділянки, детально обстежити їх та вилучити високоактивні фрагменти.

Завали будівельних конструкцій і сипучі матеріали видалятимуться не відразу з усієї площі зони робіт, а ділянками, щоб істотно не погіршити радіаційну обстановку в НБК через оголення інтенсивних ДІВ. Після поділу зони робіт на ділянки (за радіаційними і технологічними критеріями) застосовуватиметься пошаровий метод видалення завалів і скупчень ПВМ/супутніх РАВ. Щоб вилучити ПВМ та інші РАВ у зонах розбирання завалів, треба влаштувати майданчики для встановлення змінної тари. Відповідно підготовлені майданчики мають розташовуватись у зоні дії ДКА або СОК.

На максимально можливій відстані від місця вилучення потрібно організувати майданчики для встановлення захисних контейнерів (різного розміру і ступеня захисту), щоб умістити в них уже заповнену змінну тару для переміщення на подальшу обробку. Такий спосіб транспортування вилучених РАВ (у «чистих» захисних контейнерах) зменшить радіаційне забруднення споруд НБК на шляху переміщення та радіаційний вплив на експлуатаційний персонал НБК.

Для поділу РАВ за ступенем активності та відповідного переміщення до технологічної будівлі або до блока «гарячих» камер у процесі виконання робіт треба максимально ефективно проводити первинне сортування ПВМ і супутніх РАВ, відокремлюючи: фрагменти твелів і ТВЗ з відпрацьованим паливом (візуальне сортування і контроль ПД у процесі завантаження); фрагменти твелів і ТВЗ зі свіжим паливом (місце розміщення — на вузлі розвішування і поблизу нього, візуальне сортування і контроль ПД у процесі завантаження); графіт (візуальне сортування й контроль ПД у процесі завантаження); металеві конструкції (візуальне сортування й контроль ПД); залізобетонні конструкції (візуальне сортування й контроль ПД); сипучі РАВ різних категорій (пошарове видалення для розподілу РАВ різних категорій, візуальне сортування й контроль ПД у процесі завантаження); «аварійний» бетон (візуальне сортування й контроль ПД у процесі завантаження).

Оцінка можливостей СОК для безпосереднього вилучення ПВМ показує, що зважаючи на невелику швидкість пересування кранів, а також невелику швидкість підйому/опускання гака виконання технологічних операцій за допомогою СОК можливе лише в поєднанні з іншими механізмами. Доцільно розглянути сценарій, за яким основний обсяг робіт з вилучення ПВМ у ЦЗ об'єкта «Укриття» виконують за допомогою ДКА, а СОК НБК використовують як для доставки ДКА до місця робіт і транспортування контейнерів з РАВ, так і для виконання окремих операцій за допомогою інструментів МІП на верхніх позначках ЦЗ об'єкта «Укриття» (наприклад, при вилученні ВАВ з містків вузла розвішування свіжого палива, покриттів приміщень барбан-сепараторів). Крім того, СОК НБК та інструменти МІП можуть знадобитися



---

---

під час обладнання майданчиків для ДКА та контейнерів, а також подачі в зону робіт додаткового обладнання або допоміжних механізмів.

За допомогою ДКА також можна здійснювати попереднє сортування РАВ. Робочі органи ДКА мають бути оснащені спеціальними захищеними приладами для контролю та вимірювання показників радіаційного забруднення демонтованих елементів (щоб приймати рішення про подальше поводження з ними) та системою відеоспостереження (для контролю за технологічним процесом).

Радіоактивні відходи і ПВМ із зони виконання робіт у ЦЗ об'єкта «Укриття» до місця їх обробки треба транспортувати у захисних контейнерах, що міститимуть змінну тару, яку виймають для завантаження та знову встановлюють у контейнери. Первинне сортування РАВ і ПВМ виконуватиметься складанням фрагментів будівельних конструкцій (матеріалів завалів або фрагментів, що містять ПВМ) у змінну тару, яку розташовуватимуть на підготовлених майданчиках у зоні роботи дистанційно керованими агрегатами або з мобільної інструментальної платформи СОК. При цьому самі захисні контейнери мають стояти поза межами зони виконання робіт для запобігання їх забрудненню під час завантаження. Місцем встановлення захисних контейнерів можуть бути наявні металоконструкції підсилення західного фрагменту об'єкта «Укриття». Після підсилення деяких конструкцій покрівлі та організації майданчика там можна встановити кілька захисних контейнерів з різними ступенями захисту. Отже, змінну тару з РАВ (залежно від складу РАВ і ПЕД) можна встановлювати в захисний контейнер з відповідним ступенем захисту та транспортувати на майданчик тимчасового складування НБК для перевантаження й переміщення до технологічної будівлі НБК або транспортувати до «гарячих» камер.

Використовуватимуться захисні оборотні контейнери двох типів: 1) захисні контейнери для транспортування змінної тари з великогабаритними фрагментами, а також сипкими і змішаними матеріалами; 2) контейнери з підвищеним ступенем захисту для транспортування змінної тари з ПВМ.

З урахуванням специфіки ПВМ і супутніх РАВ при видаленні їх у ЦЗ є ділянки (рис. 6.24), для яких треба розробляти окремі технічні рішення: вузол розвішування свіжого палива та ходові містки ЦЗ; покриття та приміщення барабан-сепараторів; радіоактивно забруднені металоконструкції, мостовий кран ЦЗ, ферми та інші масивні металоконструкції; північний і південний басейни витримки, інші приміщення, до яких є доступ із ЦЗ; схема «Е»; завали ЦЗ.

Рекомендується така загальна послідовність виконання робіт з видалення ПВМ і супутніх РАВ з верхніх позначок об'єкта «Укриття»:

1. Фрагментація і видалення мостового крана ЦЗ, радіоактивно забруднених та інших габаритних металоконструкцій, що перешкоджають подальшому вилученню ПВМ і супутніх РАВ.



Рис. 6.24 — Модель ділянки проведення робіт у центральному залі до початку вилучення паливновмісних матеріалів

2. Видалення завалів з перекриттів приміщень барабан-сепараторів.
3. Демонтаж перекриття приміщень південних і північних барабан-сепараторів.
4. Видалення барабан-сепараторів, якщо в них та під ними будуть виявлені скупчення ПВМ.
5. Видалення фрагментів активної зони і свіжого палива з містків вузла розвішування свіжого палива.
6. Демонтаж вузла розвішування свіжого палива й підготовка майданчика для роботи ДКА в ЦЗ.

За піонерний майданчик для розміщення ДКА і навісного обладнання треба вибрати місце без люків у підлозі, оскільки металоконструкції деяких з них могли пошкодитись під час аварії. Крім того, на «піонерному» майданчику для роботи ДКА треба мати можливість підведення енергопостачання і/або систему заправки паливом для ДКА з двигунами внутрішнього згорання. Таким майданчиком може бути місце біля операторської ЦЗ (приміщення 1005/2), яке придатне для організації енергопостачання та технічного обслуговування ДКА.

---

---

7. Очищення ЦЗ за допомогою ДКА, починаючи від східної стіни у бік БВ і далі у бік схеми «Е»; видалення інших інтенсивних джерел випромінювання, що впливають на радіаційні умови в ЦЗ, відкрито лежачих фрагментів твелів, графітових блоків.

Оскільки люки більшості шахт ЦЗ були зірвані зі штатних місць під час аварії, потрібно уважно підійти до вибору типу ДКА з огляду на його габарити, щоб він міг вільно пересуватись по ЦЗ. Відкриті отвори шахт у ЦЗ треба захистити металевими щитами, здатними витримати навантаження від працюючого ДКА, і закривати їх під час розбирання завалів. Надалі при видаленні завалів і звільненні доступу в приміщення, що з'єднані з ЦЗ, досліджуються наявність у них ПВМ та можливість їх видалення (у разі виявлення). Після звільнення приміщень вирішується питання щодо використання їх для завантаження короткоіснуючих НАВ і САВ (насамперед великогабаритних фрагментів обладнання та залізобетонних і металевих конструкцій).

8. Стабілізація схеми «Е» для видалення фрагментів технологічних каналів з ТВЗ за допомогою ДКА і/або МПП.

Стабілізувати схему «Е» можна, використовуючи чотиригранну металеву рамну конструкцію, яка збиратиметься окремо і монтуватиметься над шахтою реактора об'єкта «Укриття» за допомогою СОК НБК. Металоконструкція схеми «Е» буде розкріплена до рамної конструкції за допомогою домкратів і захватів. Щоб підготувати місця під встановлення рамної конструкції, виконуватимуться роботи з часткового очищення завалів за допомогою ДКА. Повне очищення проводиться після стабілізації схеми «Е» за допомогою ДКА і/або МПП.

Стабілізація схеми «Е» може здійснюватися і в інші способи, наприклад підведенням у шахту реактора додаткових опірних балок, монтажем та закріпленням на обичайці схеми «Е» кронштейнів-«вух» та навіть заповненням шахти реактора пористим бетоном.

9. Видалення фрагментів технологічних каналів з ТВЗ зі схеми «Е» за допомогою ДКА і/або МПП.

Звільнення схеми «Е» від фрагментів технологічних каналів з ТВЗ у подальшому дасть змогу розрізати їхні металоконструкції, вилучати засипку із серпентиніту та провадити поступовий її демонтаж. Використана рамна конструкція може стати каркасом екрануючої споруди над зруйнованою шахтою реактора об'єкта «Укриття» для подальшої консервації підреакторних приміщень об'єкта «Укриття» або для контрольованого доступу в них.

10. Видалення підвішених відпрацьованих ТВЗ з південного БВ, вилучення ПВМ з дна південного та північного БВ (рис. 6.25).

Обстеження південного БВ за допомогою оптичного приладу через похилі свердловини виявили, що люки БВ над свердловинами не зірвані і пенали з відпрацьованими ТВЗ висять у штатному положенні. На цей час немає достовірних відомостей про стан відпрацьованих ТВЗ у південному БВ, але можна припустити, що частина їх

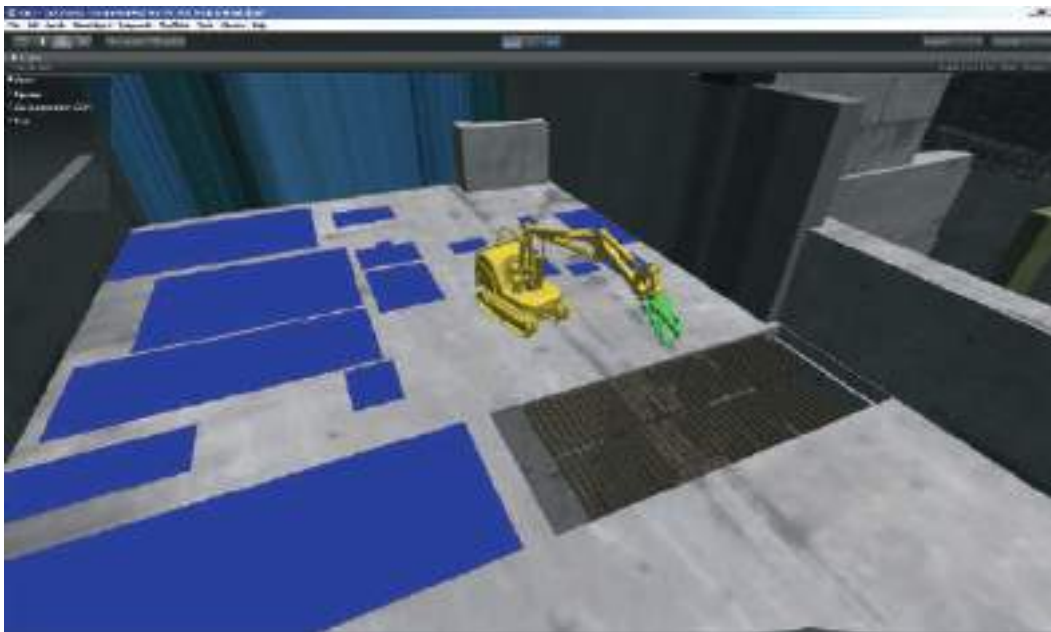


Рис. 6.25 — Робота дистанційно керованого апарата з вилучення відпрацьованих тепловидільних збірок з південного басейну витримки

пошкоджена. Обстеження ЦЗ показало, що люки північного БВ зірвані зі своїх місць, а на його дні виявлено скупчення ПВМ.

11. Уточнення радіаційної обстановки в ЦЗ, пошук і видалення ПВМ, що залишилися.

**Вилучення ПВМ із зон 2 і 3.** Вилучення ПВМ з проміжних і нижніх позначок має певні особливості і, насамперед, супроводжується деякими проблемами у разі застосування вертикального методу за допомогою СОК, а саме:

необхідністю демонтажу значної частини масивних залізобетонних конструкцій, що розташовані над скупченнями ПВМ, для організації доступу в зони виконання робіт із вилучення ПВМ;

низькою продуктивністю кранів НБК при переміщенні вантажів з проміжних і нижніх позначок та обмеженими можливостями МІП на цих позначках;

довгою тривалістю процесу вилучення паливовмісних матеріалів з верхніх позначок; це може суттєво віддалити початок робіт на проміжних і нижніх позначках, що потенційно створює реальну загрозу стосовно повного закінчення робіт з вилучення паливовмісних матеріалів на цих позначках протягом життєвого циклу НБК.



---

---

Тому перспективним є варіант організації робіт з вилучення ПВМ на проміжних і нижніх позначках методом горизонтального доступу.

Для демонстрації організації горизонтального доступу до скупчень ПВМ на нижніх позначках наведемо тривимірну модель фрагмента об'єкта «Укриття» (рис. 6.26). Як бачимо, створення шляхів доступу до місць локалізації ПВМ ускладнено наявними стінами, напливами бетону та перекриттями на різних рівнях. Стіни та перекриття, які треба демонтувати, виділені білим кольором. Напливи бетону, завали з металоконструкцій та обладнання, що розташовані на шляхах доступу і є РАВ, також підлягають видаленню.

Загальний вигляд шляхів доступу до місць локалізації ПВМ після виконання часткового демонтажу конструкцій, видалення напливів бетону і завалів, а також монтажу підйимального механізму (вантажного ліфта) для переміщення потрібного робочого обладнання (зокрема, дистанційно керованих апаратів) та первинних упаковок з ПВМ наведено на рис. 6.27.

Для доставки механізмів у зони виконання робіт, а також організації закінченої схеми поводження з вилученими ПВМ та іншими РАВ, охоплюючи їх передачу на інші ділянки для подальшого поводження, пропонується будівництво зовнішньої закритої естакади, оснащеної вантажопідйимальним механізмом (рис. 6.28).

Контейнери з ПВМ переміщатимуться до краю закритої естакади і за допомогою рольгангового механізму — до стропувального майданчика, розташованого в кінці естакади (рис. 6.29). З цього майданчика, за допомогою крана НБК, ПВМ в захисному контейнері транспортуватимуться для подальшого поводження.

У загальному вигляді транспортно-технологічна схема вилучення ПВМ з нижніх позначок охоплює такі етапи:

- створення шляхів доступу до скупчень ПВМ;
- розробка (розбирання, різання, розпушування для відділення ПВМ від конструкцій об'єкта «Укриття») та фрагментація ПВМ у місцях скупчень;
- контейнеризація ПВМ у первинну упаковку (бочки);
- транспортування до вантажного ліфта;
- завантаження первинних упаковок (бочок) у транспортний контейнер;
- піднімання транспортного контейнера з бочками до краю естакади;
- радіаційний контроль;
- деактивація транспортного контейнера (за потреби) в камері первинної дезактивації;
- завантаження кран-балкою транспортного контейнера з бочками в захисний контейнер;
- переміщення захисного контейнера до майданчика стропування;
- стропування захисного контейнера та його переміщення за допомогою СОК НБК або іншого вантажопідйимального механізму для подальшого поводження з ПВМ.



Рис. 6.26 — Модель фрагмента об'єкта «Укриття»



Рис. 6.27 — Шляхи доступу до скупчень паливовмісних матеріалів

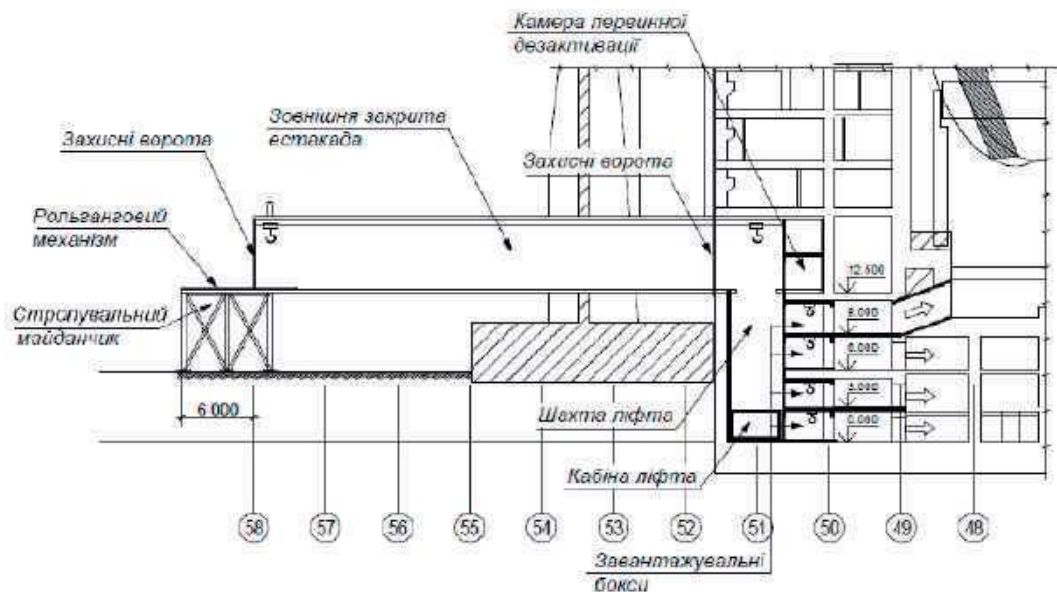


Рис. 6.28 — Загальна схема зовнішньої закритої естакади

Великий обсяг і надзвичайна складність робіт з вилучення ПВМ з нижніх позначок суттєво впливають на можливість їх повного закінчення протягом життєвого циклу НБК. Тому не можна відкидати варіант відкладеного вилучення ПВМ з нижніх позначок об'єкта «Укриття» після зняття з експлуатації НБК. На користь цього сценарію говорять такі обставини:

будівельні конструкції приміщень на нижніх позначках мають задовільний стан, тобто можуть ефективно виконувати функцію фізичних бар'єрів відносно тривалий час;

у разі організації горизонтального доступу до приміщень на нижніх позначках є можливість оснастити автономну механізовану схему подачі в зони виконання робіт потрібних механізмів та обладнання, а також вилучити за межі об'єкта «Укриття» ПВМ та інші РАВ у захисних контейнерах без використання систем НБК, зокрема СОК.

Отже, запропонований варіант організації робіт на основі методу горизонтального доступу розв'язує проблему вилучення ПВМ з нижніх позначок об'єкта «Укриття» як у короткостроковій перспективі (протягом життєвого циклу НБК), так і відкладеного вилучення вже після зняття НБК з експлуатації.

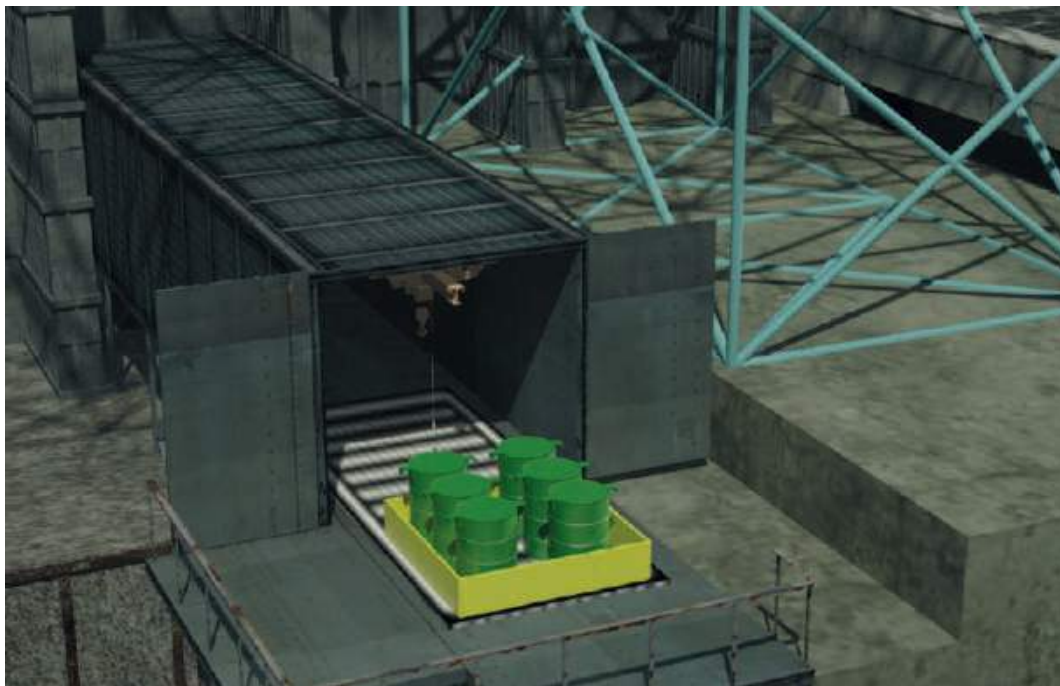


Рис. 6.29 — Загальний вигляд естакади зі стропувальним майданчиком

У транспортно-технологічній схемі поводження з ПВМ після їх вилучення з приміщень об'єкта «Укриття» треба максимально використовувати інфраструктуру НБК. Аналізуючи наявну інфраструктуру НБК, можна дійти таких попередніх висновків стосовно того, чи відповідають вимогам щодо технічного та технологічного забезпечення робіт на етапі вилучення ПВМ:

система основних кранів та інші транспортні засоби НБК (вилочний навантажувач, самохідні візки) — так;

розміри майданчика тимчасового складування (розміщення необхідних технологічних ділянок) — так;

системи поводження з РАВ, що містяться в технологічній будівлі, — ні;

системи технологічної будівлі для дезактивації, технічного обслуговування та ремонту змінних робочих інструментів ДКА та МІП — так;

системи НБК для дезактивації, технічного обслуговування та ремонту ДКА та МІП — ні.

Міжнародний і вітчизняний досвід поводження з високоактивними ДІВ, до яких належать ПВМ, свідчить про необхідність створення «гарячих» камер. У НБК «гарячих» камер не передбачено. Тому в підготовчий період до етапу вилучення ПВМ



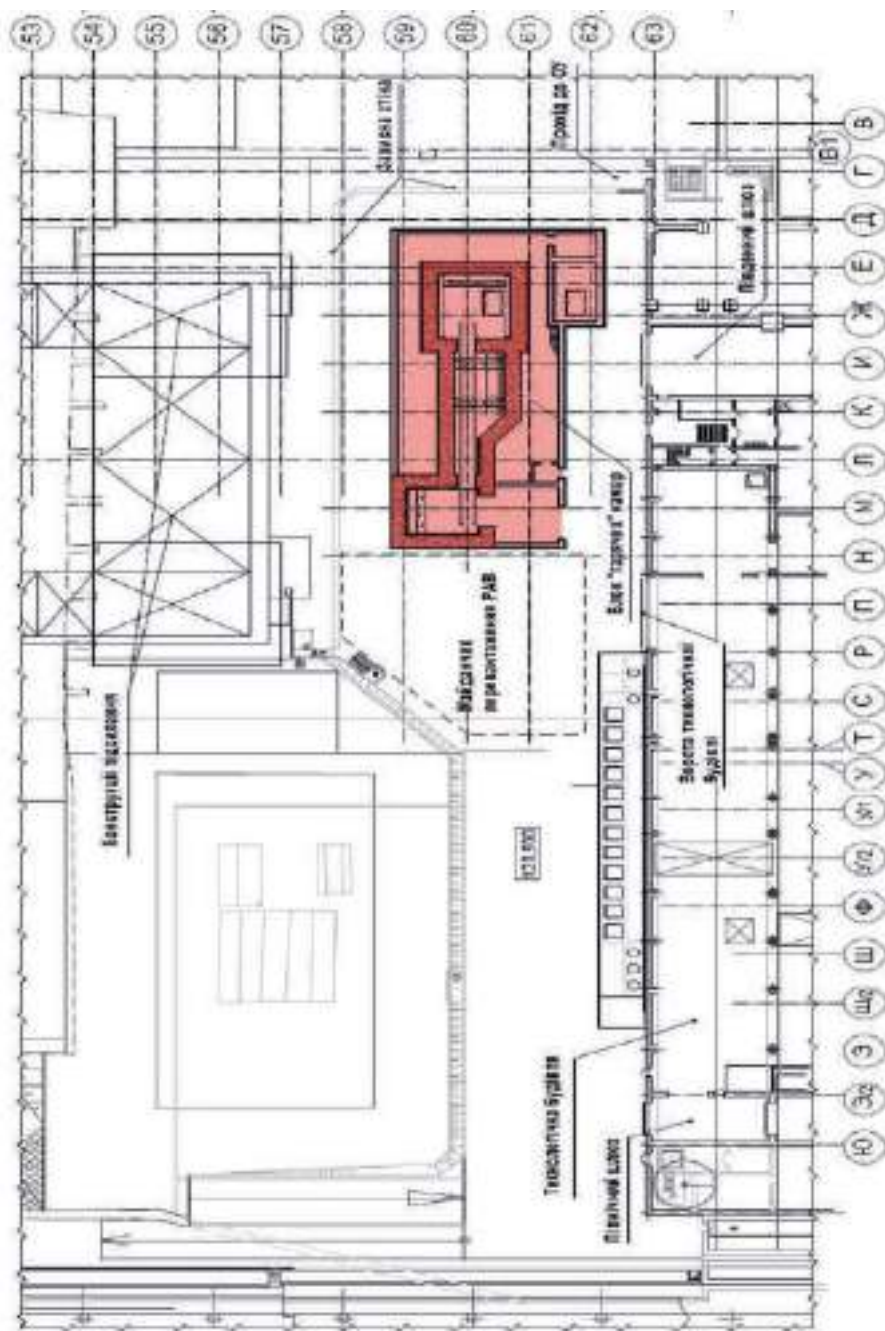


Рис. 6.30 — Розташування будівлі блока «гарячих» камер та наявних об'єктів інфраструктури НБК

---

у просторі під НБК треба збудувати нову споруду — блок «гарячих» камер із ділянкою дезактивації й усіма іншими потрібними ділянками та системами життєзабезпечення (вентиляція, енергопостачання, промислове телебачення тощо). З огляду на об'ємно-планувальні рішення та інфраструктуру НБК можливе створення блока «гарячих» камер на майданчику тимчасового складування, який буде вільним після демонтажу нестабільних конструкцій. Як прототип блока «гарячих» камер може розглядатися технологічна лінія заводу WEP у Великобританії [192] (рис. 6.30). У блоці «гарячих» камер мають здійснюватися:

- додаткова фрагментація;
- сортування (відділення ПВМ від інших РАВ); це дуже важлива операція, зважаючи на великі витрати на майбутнє зберігання ПВМ та захоронення;
- розміщення ПВМ у первинні упаковки (бочки) та паспортизація;
- завантаження бочок з ПВМ у захисний контейнер і його передача на тимчасове зберігання.

Оскільки вилучені з об'єкта «Укриття» ПВМ за класифікацією НРБУ-97/Д-2000 є довгоіснуючими відходами і підлягають захороненню тільки у сховищах, розташованих в стабільних геологічних формаціях, а таких сховищ в Україні не існує (їх створення можливе тільки у віддаленій перспективі), треба вирішувати проблему щодо тимчасового (довгострокового) зберігання ПВМ. Отже, потрібна організація проміжного сховища ПВМ.

Як показує зарубіжний і вітчизняний досвід, для довгострокового контейнерного зберігання відпрацьованого ядерного палива і ВАВ можна використовувати відкриті майданчики, забезпечені системами фізичного захисту й іншими системами, в яких зберігання захисних контейнерів є безпечним. Така схема довгострокового зберігання цілком придатна і для ПВМ, вилучених з об'єкта «Укриття».

Майданчиком для проміжного сховища ПВМ може слугувати наявна бетонна платформа для складання металоконструкцій арки, розташована на відстані близько 300 м від НБК. Ця платформа має діючу освітлювальну мережу, систему відведення зливових вод з басейнами-відстійниками, огороження, інфраструктуру фізичного захисту та контролю доступу [8]. Огорожу можна додатково модернізувати відповідно до специфічних вимог охорони такого типу сховищ РАВ.

Площа майданчика в межах між південним і північним фундаментами арки становить понад 22 тис. м<sup>2</sup>. Він розташований безпосередньо перед НБК, поза межами організованих під'їзних і пішохідних шляхів до НБК. Отже, майданчик бетонної платформи для збирання арки НБК максимально підходить до улаштування на її території сховища для довгострокового зберігання контейнерів з ПВМ.

---

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Закінчення будівництва і введення в експлуатацію НБК стало найвагомішим результатом багаторічної діяльності з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему. Науково-технічна і соціальна значущість такої діяльності полягає в досягненні кардинального зниження ризику негативного впливу на довкілля джерел ядерної та радіаційної небезпеки, зосереджених в об'єкті «Укриття». Але НБК — це не тільки захисна споруда навколо об'єкта «Укриття», а й комплекс сучасних систем безпеки, контролю й життєзабезпечення та розвинена інфраструктура, які потрібні для поточної експлуатації НБК і подальшої діяльності з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему.

Як і 35 років тому, найвагомішим джерелом небезпеки об'єкта «Укриття» є матеріали, що містять опромінене паливо. Після встановлення НБК істотно змінились волого-температурні умови перебування ПВМ. Із зміною рівня зволоження ядерно небезпечних скупчень поступово зростає щільність потоку нейтронів, і цей процес триватиме до висихання критичної композиції, тобто мінімум ще два роки. В такий період важливими є постійний контроль названих параметрів та заходи щодо запобігання зростанню критичності до небезпечних рівнів.

Час, умови середовища та особливості фізико-хімічних характеристик ПВМ впливають на зміну їх міцності, що призводить до утворення та накопичення дрібних, пилоподібних частинок з високою радіоактивністю. Зараз спостерігається зростання інтенсивності процесів деградації. За створеною моделлю еволюції ПВМ, яка враховує наявні швидкості їх окислення, руйнування ядерних матеріалів може статися через 25—50 років. Як на ці процеси вплине спорудження НБК над об'єктом «Укриття», ще треба з'ясувати.

Проте вже зрозуміло, що НБК суттєво вплинув на стан радіаційної безпеки на майданчику. Рівні потужності експозиційної дози на прилеглій території після встановлення НБК у проєктне положення знизились більше ніж удесятеро. Так само радикальні зміни є і в поведінці радіоактивних аерозолів, які з рухом повітря викидалися з об'єкта «Укриття» в навколишнє середовище: їхня загальна активність викиду в простір під аркою зменшилась майже втричі. Разом з тим, через відсутність можливості розсіюватись у просторі на великі відстані радіоактивний пил накопичується на внутрішніх поверхнях НБК та об'єкта «Укриття». Порівняно

---

---

з періодом до побудови НБК щільність випадінь радіонуклідів на внутрішні поверхні зросла удвічі.

Унеможливлення надходження опадів в об'єкт «Укриття» значно змінило стан та характеристики радіоактивних вод. Деякі водні скупчення зникли, а об'єм деяких вимірюється кількома кубометрами і коливається залежно від сезону. Об'ємна активність радіонуклідів у цих скупчення збільшилась у рази. Єдине скупчення радіоактивних вод, яке залишилось без змін, розташоване в прим. 012/13; джерело надходження води треба встановити.

На місці висохлих скупчень радіоактивної води утворюються донні дрібно-дисперсні відкладення з високим вмістом радіонуклідів. Вони можуть стати новими джерелами радіоактивних аерозолів здатність цих компонентів впливати на стан радіаційної безпеки потребує додаткового вивчення.

Отже, з побудовою НБК стан компонентів та параметрів, що визначають радіаційну безпеку об'єкта «Укриття», зазнав вагомих змін. Воднораз із покращенням умов спостерігаються негативні прояви, значення яких ще маємо дослідити.

Створення НБК є надзвичайно важливим етапом реалізації стратегії перетворення об'єкта «Укриття», але не остаточним розв'язанням проблеми. Скупчення ПВМ, що утворилися внаслідок запроектої аварії на четвертому енергоблоці, продовжують бути головним джерелом небезпеки. З огляду на те що гарантований термін експлуатації НБК становить лише 100 років, а періоди напіврозпаду ядерних матеріалів у ньому на багато порядків більші, небезпека для довкілля існуватиме не одне тисячоліття. Тому надзвичайно важливим є переведення у контрольований стан та вилучення ПВМ до того, як процес руйнування їх може набути масштабного характеру. Проблема подальшого перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему зберігає свою актуальність і після введення в експлуатацію НБК.

Першочерговим завданням після введення в експлуатацію НБК є демонтаж нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття». Реалізовані 2004—2008 роками невідкладні стабілізаційні заходи забезпечують прийнятний рівень безпеки об'єкта «Укриття» на 15-річний строк експлуатації стабілізованих конструкцій, тобто тільки до кінця 2023 року. Але закономірно виникає питання: навіщо демонтувати конструкції об'єкта «Укриття» після створення НБК, адже той виконує функцію захисної споруди над об'єктом «Укриття»? Безумовно, НБК відіграє важливу роль у мінімізації негативних наслідків для довкілля у разі потенційного обвалення конструкцій об'єкта «Укриття». Проте обвалення супроводжуватиметься інтенсивним підніманням радіоактивного пилу і аерозолів, через що зазнають суттєвого радіоактивного забруднення конструкції й технологічні системи НБК; це погіршить радіаційну обстановку, призведе до додаткового опромінення експлуатаційного персоналу і проведення затратних робіт з дезактивації. Падіння нестабільних конструкцій на пошкоджені будівельні конструкції енергоблока може спровокувати обвалення останніх і зруйнувати



---

---

наявні інженерні бар'єри навколо скупчень ПБМ, що матиме негативні наслідки для рівня ядерної та радіаційної безпеки. До того ж, обвалення нестабільних конструкцій створить певні проблеми у подальшій діяльності з перетворення об'єкта «Укриття», оскільки ускладнить доступ до ПБМ, щоб перевести їх у контрольований стан, зокрема з метою вилучення.

За результатами оцінки ймовірності обвалення конструкцій і радіаційних наслідків реалізації такого сценарію сформовано перелік нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття», які підлягають «ранньому» або «відкладеному» демонтажу. «Ранній» демонтаж, як перший етап першочергових робіт з демонтажу нестабільних конструкцій, має розпочатися відразу після введення в експлуатацію НБК; другий етап, тобто «відкладений» демонтаж, є продовженням «раннього», він має розпочатися відразу після закінчення першого етапу.

У розроблених концептуальних рішеннях щодо демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» визначено обсяг і послідовність виконання демонтажних робіт, запропоновано принципові технологічні схеми поводження з різними видами радіоактивних відходів, а також передбачено: 1) створення інфраструктури для демонтажу нестабільних конструкцій всередині НБК; 2) розширення й модернізацію інфраструктури поводження з РАВ на майданчику Чорнобильської АЕС для поводження з усіма видами радіоактивних відходів, а особливо з високоактивними, утворення яких прогнозується під час розбирання завалів на верхніх позначках об'єкта «Укриття»; 3) можливість тимчасового зберігання тих РАВ, які не відповідають критеріям приймання до захоронення, на розташованому всередині НБК спеціальному майданчику.

Перший з переліку проектів демонтажу нестабільних конструкцій стосується металевої ферми, встановленої під час стабілізації південної покрівлі об'єкта «Укриття». Одне з призначень розробки та реалізації цього проекту — продемонструвати можливість та ефективність використання інфраструктури, створеної в рамках НБК, а також обґрунтувати потребу в додатковому оснащенні ділянок та систем НБК для демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта. Демонтаж металевої ферми заплановано на 2022 рік.

Після спорудження огорожувального контуру НБК і встановлення арки у проектне положення частини будівлі енергоблока, що входять до складу об'єкта Укриття, залишилися поза межами НБК. Дослідження технічного стану конструкцій цих частин показали, що вони не відповідають вимогам, які висуваються до конструкцій НБК, і мають бути підсилені або демонтовані. За результатами виконаного аналізу варіантів реконструкції виступаючих частин об'єкта Укриття» прийнято Технічне рішення «Про вибір варіанта реконструкції частин деаераторної етажерки та машзалу об'єкта «Укриття», що виступають за межі огорожувального контуру НБК», в якому передбачено: 1) реконструкцію східної та західної частин деаераторної етажерки

---

об'єкта «Укриття» виконати підсиленням конструкцій; 2) реконструкцію західної частини машзалу об'єкта «Укриття» виконати демонтажем конструкцій; 3) місце зберігання демонтованих конструкцій західної частини машзалу організувати в приміщеннях машзалу об'єкта «Укриття» з подальшим облаштуванням нової покрівлі; 4) реконструкцію східної частини машзалу об'єкта «Укриття» виконати підсиленням конструкцій.

Після демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» і реконструкції виступаючих за межі НБК частин потрібно рухатися далі в напрямку перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему. На цей час маємо три основні стратегії подальшого перетворення об'єкта «Укриття»: захоронення на місці за допомогою заповнення бетоном або іншими сумішами; тимчасова ізоляція з намірами відкладеного вилучення ПВМ; поетапне вилучення ПВМ.

Варіант «захоронення на місці» пропонувався у різних варіаціях ще задовго до прийняття рішення про будівництво НБК. На перший погляд, такий варіант є прийнятним з огляду на порівняно швидке вирішення проблеми перетворення об'єкта «Укриття». Але він має серйозні недоліки, зокрема:

заповнення бетоном приміщень об'єкта «Укриття» призведе до суттєвого перевантаження й осідання ґрунтової основи, а отже, до значних деформацій як пошкоджених будівельних конструкцій четвертого енергоблока, так і суміжних конструкцій третього енергоблока з можливим їх руйнуванням, що негативно вплине на стан конструкцій, які виконують функцію огорожувального контуру НБК, та на фундаменти НБК. Це може в свою чергу вплинути на зниження показників експлуатаційної надійності НБК (зокрема на неможливість експлуатації основних кранів), а в найгіршому випадку призвести до руйнування НБК;

бетонування скупчень ПВМ унеможливує надійний контроль стану ядерних матеріалів, що не відповідає вимогам до забезпечення ядерної безпеки;

навіть у разі успішної реалізації варіанта «захоронення на місці» проблема безпеки об'єкта «Укриття» вирішується тільки на короткострокову перспективу. Така споруда не є довговічною навіть за якісного бетонування приміщень, що практично нездійсненно в умовах об'єкта «Укриття»;

варіант «захоронення на місці» не дає змоги досягти кінцевого стану об'єкта «Укриття» як екологічно безпечної системи, оскільки він не забезпечує надійної ізоляції ПВМ та інших довгоіснуючих РАВ на весь період їх небезпеки для довкілля, а отже, не відповідає вимогам нормативно-правових актів у сфері радіаційної та екологічної безпеки.

Варіант «тимчасова ізоляція» також передбачає заповнення приміщень об'єкта «Укриття» бетоном або іншими сумішами, але значно в меншому обсязі з огляду на потребу ізолювати ПВМ тільки на певний проміжок часу. Порівняно з варіантом «захоронення на місці», за цим варіантом пропонується створення додаткових бар'єрів

---

---

навколо скупчень ПВМ та їх вилучення в подальшому. Це той самий варіант відкладеного вирішення проблем об'єкта «Укриття», але з обтяжуючими обставинами, оскільки виникають додаткові труднощі в майбутній діяльності (суттєво збільшуються складність і масштаби робіт з розбирання об'єкта «Укриття» після його бетонування, відповідно збільшуються об'єми утворюваних РАВ тощо).

Варіант «поетапне вилучення» передбачає першочергове вилучення найнебезпечніших скупчень ПВМ протягом життєвого циклу НБК. Частина менш небезпечних ПВМ може бути вилучена як протягом життєвого циклу НБК, так і після його зняття з експлуатації. Зважаючи на відповідність вимогам з ядерної, радіаційної, екологічної та загальнопромислової безпеки, а також на можливість практичної реалізації (враховуючи наявність НБК), стратегія «поетапного вилучення» має суттєві переваги і розглядається як пріоритетна.

Перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему за стратегією «поетапного вилучення ПВМ» можна втілювати низкою потенційних сценаріїв. Сценарій, який передбачає вилучення ПВМ протягом життєвого циклу НБК (крім ПВМ, що локалізовані у техногенному ґрунті, оскільки вони розміщені під спорудами НБК), є найамбітнішим, і потрібно намагатися його реалізувати. Проте слід розглядати й інші сценарії зважаючи на реальні можливості такої масштабної та складної діяльності, як вилучення ПВМ та подальше поводження з ними. Відкладене вилучення окремих ядерно безпечних скупчень ПВМ, розташованих у приміщеннях із задовільним станом будівельних конструкцій і ефективним виконанням ними функцій інженерного бар'єра, можливе й після зняття з експлуатації НБК (тобто через 100 років і більше). Остаточний висновок щодо найкращого сценарію переведення у контрольований стан та вилучення ПВМ можна зробити після детального опрацювання низки потенційних сценаріїв та порівняння їх на основі багатокритеріального аналізу. Така робота наразі виконується.

Майбутня діяльність з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему провадитиметься на об'єкті, для якого немає аналогів у світовій практиці, — вона є унікальною і потребує відповідного нормативно-правового забезпечення. За результатами аналізу вимог національних нормативно-правових актів і міжнародних норм, правил та стандартів виявлено низку питань.

Зокрема, на сьогодні статус об'єкта «Укриття» без урахування НБК визначено в НРБУ-97/Д-2000 як «місце поверхневого зберігання неорганізованих РАВ (тимчасове сховище неорганізованих РАВ, яке знаходиться в стадії стабілізації і реконструкції)». Підставою для кваліфікації об'єкта «Укриття» як тимчасового сховища РАВ було припущення, що матеріали, які містять ядерне паливо, ні зараз і ніколи в майбутньому не можуть бути використані. На наш погляд, такий статус не є коректним, оскільки ПВМ, які містяться в об'єкті «Укриття», включені в інвентарний список ядерних матеріалів і до них застосовуються гарантії МАГАТЕ. Крім того, з огляду

---

---

на те що ПВМ є головним джерелом небезпеки об'єкта «Укриття», а також його своєрідною «візитівкою», логічно було б у визначенні статусу об'єкта «Укриття» сказати про присутність у ньому матеріалів, які містять ядерне паливо. Після введення в експлуатацію НБК об'єкт «Укриття» буде інтегрований у комплекс НБК, що потребує визначення статусу цього новоутворення.

Із самого початку застосування гарантій МАГАТЕ стосовно ядерних матеріалів об'єкта «Укриття» виникали складнощі щодо постановки їх під гарантії. Насамперед це було пов'язано з неможливістю використовувати стандартні процедури обліку, що застосовують до неаварійних ядерних матеріалів Чорнобильської АЕС, а також з неможливістю ідентифікувати заявлені ядерні матеріали. Тому під час постановки під гарантії МАГАТЕ ядерних матеріалів об'єкта «Укриття» прийняли компромісне рішення про заявлення кількості ядерних матеріалів на момент перед аварією, тобто станом на 25 квітня 1986 року. Отже, до початку вилучення ПВМ з об'єкта «Укриття» має бути розроблена й погоджена з МАГАТЕ нормативно-правова і нормативно-технічна документація щодо поводження з аварійними відходами, які містять ядерні матеріали.

Забезпечення ядерної безпеки в Україні у процесі поводження з ядерними матеріалами регламентується низкою нормативних документів, які встановлюють загальні вимоги, критерії та принципи забезпечення безпеки під час поводження з ядерним паливом атомних станцій, дослідницьких ядерних реакторів, критичних і підкритичних збірок, сховищ відпрацьованого ядерного палива. Для таких ядерних матеріалів встановлені вимоги до критичності на всіх етапах їхнього життєвого циклу, а також вимоги до безпечної геометрії їхніх скупчень.

На об'єкті «Укриття» ми маємо справу з неорганізованими, хаотичними скупченнями ядерно небезпечних матеріалів у вигляді ПВМ, для яких існує ризик виникнення критичності. Проблема неконтрольованого надходження атмосферних опадів, що створювало ризик виникнення критичності, після встановлення НБК втратила свою актуальність. Однак через руйнування скупчень ПВМ в умовах НБК під впливом зовнішніх факторів і небезпеку обвалення будівельних конструкцій об'єкта «Укриття» не виключена можливість неконтрольованої зміни геометрії скупчень ПВМ з викидом пилу в простір під НБК. Тому для регламентації вилучення і контейнеризації ПВМ має існувати відповідна нормативно-правова база, нормативний документ щодо забезпечення ядерної безпеки безпосередньо об'єкта «Укриття» в умовах НБК — документ, який охоплює всі етапи поводження з ПВМ: вилучення, контейнеризацію, організацію місць тимчасового зберігання або захоронення, виконання транспортно-технологічних операцій, а також (за потреби) вимоги до тривалої консервації окремих скупчень ПВМ, вилучення яких не є невідкладним завданням.

Одним з ключових питань стосовно забезпечення подальшого перетворення об'єкта «Укриття» є визначення чітких критеріїв довгострокового зберігання

---

---

й захоронення ПБМ та інших РАВ після їхнього вилучення. В останні роки в Україні зроблені певні кроки щодо оптимізації системи поводження з РАВ і вдосконалення системи їх класифікації. За підтримки Єврокомісії в межах Програми міжнародного співробітництва з ядерної безпеки експертами консорціуму DBE TECHNOLOGY GmbH (Німеччина), ANDRA (Франція), COVRA (Нідерланди), ENRESA (Іспанія) і SKB International AB (Швеція), з широким залученням українських експертів, виконано проєкт «Удосконалення системи класифікації РАВ в Україні», результатом чого стала запропонована модифікована система класифікації РАВ, до якої входять дуже низькоактивні відходи (ДНАВ), низькоактивні відходи (НАВ), середньоактивні відходи (САВ) і високоактивні відходи (ВАВ). Впровадження класу ДНАВ вже знайшло своє відображення у прийнятому Законі України «Про внесення змін до деяких законів України щодо вдосконалення законодавства у сфері поводження з радіоактивними відходами», який набирає чинності 07.11.2021.

До ДНАВ належать радіоактивні відходи, активність радіонуклідів в яких перевищує рівні вилучення або звільнення (нижня межа віднесення відходів до ДНАВ), проте за своїми радіологічними характеристиками вони можуть передаватися на захоронення в найпростіші поверхневі сховища. На діяльність з перетворення об'єкта «Укриття» запровадження цього класу матиме позитивний вплив, оскільки до нього належатиме частина РАВ, що утворюватимуться під час виконання робіт. Насамперед, це вторинні відходи, представлені забрудненими засобами індивідуального захисту, інструментами та іншим обладнанням, які не підлягають дезактивації.

НАВ — відходи, у разі захоронення яких у приповерхневих сховищах, обладнаних системою багатобар'єрного захисту, можуть бути досягнуті цілі безпеки з тривалістю адміністративного контролю не більше ніж 300 років. За верхню межу НАВ, згідно з рекомендаціями МАГАТЕ, прийнято максимально допустиму сумарну питому активність  $\alpha$ -випромінюючих радіонуклідів 4000 кБк/кг (в окремій упаковці) наприкінці періоду адміністративного контролю при 400 кБк/кг у середньому по сховищу.

САВ — відходи, які мають бути захоронені в сховищах на проміжних глибинах або на великих глибинах разом з ВАВ. За нижню межу САВ рекомендується брати питому активність  $\alpha$ -випромінюючих радіонуклідів (щонайменше 4000 кБк/кг). Верхня межа визначається рівнем тепловиділення меншим ніж 2 кВт/м<sup>3</sup>. За такої системи класифікації до САВ належатиме значна частина відходів об'єкта «Укриття».

ВАВ — відходи, які можуть бути захоронені тільки в глибинних сховищах. Вони характеризуються високою питомою активністю ( $10^4$ — $10^6$  ТБк · м<sup>-3</sup>), тепловиділенням вищим за 2 кВт/м<sup>3</sup>, високим вмістом довгоіснуючих радіонуклідів.

Попередні результати розрахунків показали, що енерговиділення ПБМ у 2060 році становитиме 0,36 кВт/м<sup>3</sup>, у 2120-му — 0,12 кВт/м<sup>3</sup>. Це означає, що на той час, коли найімовірніше проводитиметься вилучення ПБМ, відповідно до запропонованої модифікованої класифікації в об'єкті «Укриття» практично не буде ВАВ, які



---

---

потребуватимуть захоронення у стабільних глибоких геологічних формаціях, тобто ПВМ можуть бути віднесені до класу САВ і захоронені у сховищі на середніх глибинах (кілька десятків — сотень метрів від поверхні землі).

Впровадження модифікованої системи класифікації РАВ матиме позитивний вплив на діяльність з подальшого перетворення об'єкта «Укриття», оскільки дасть змогу істотно зменшити витрати на захоронення РАВ завдяки використанню економічніших варіантів ізоляції їх від біосфери.

У діяльності з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему найважливішим завданням, якщо говорити про короткотермінову перспективу, є демонтаж нестабільних конструкцій. Втім успіх реалізації наступних кроків, таких як обґрунтування та розробка технологій вилучення ПВМ, створення інфраструктури для поводження з ними на майданчику Чорнобильської АЕС і подальше захоронення в спеціальному сховищі, вимагатиме тривалої концентрації наукових, технічних та фінансових ресурсів. Зважаючи на масштабність завдань стає зрозумілим, що для їх реалізації надзвичайно важливо саме зараз, саме в умовах, що склались через 35 років після аварії, залучити міжнародні наукові, політичні, фінансові інституції для об'єднання зусиль у створенні спеціального фонду підтримки такої діяльності. Досвід реалізації Проекту здійснення заходів на майданчику Чорнобильської АЕС засвідчив, що такий механізм міжнародної допомоги є ефективним, а побудований і введений в експлуатацію НБК є цьому наочним підтвердженням.

---

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Авария на Чернобыльской АЭС: опыт преодоления, извлеченные уроки / А. В. Носовский, В. Н. Васильченко, А. А. Ключников, Б. С. Пристер ; под ред. А. В. Носовского. — Киев : Техника, 2006. — 264 с. + цв. вкл. на 32 с. — (Серия «Безопасность атомных станций»).
2. Носовський А. В. З досвіду організації робіт при будівництві об'єкта «Укриття» Чорнобильської АЕС у 1986 році / А. В. Носовський // Безпека та нерозповсюдження. — Київ, 2006. — № 6 (18). — С. 2—9.
3. Объект «Укрытие». История, состояние и перспективы : [Монография] / В. Н. Герасько, А. А. Ключников, А. А. Корнеев [и др.] ; под ред. А. А. Ключникова. — Киев : Интерграфик, 1997. — 224 с.
4. Носовський А. В. Науково-технічні проблеми перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему : матеріали парламентських слухань у Верховній Раді України 16 березня 2016 р. «30 років після Чорнобиля: уроки та перспективи». — Київ : Парламентське видавництво, 2016. — С. 50—51.
5. Об'єкт «Укриття»: 30 років після аварії : [Монографія] / В. О. Краснов, А. В. Носовський, В. М. Рудько, В. М. Щербін ; НАН України, Ін-т проблем безпеки АЕС. — Чорнобиль, 2016. — 512 с.
6. Ключніков О. О. Науково-технічні аспекти перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему / О. О. Ключніков, А. В. Носовський // Наукові вісті НТУУ КПІ. — Київ, 2004. — № 4 (36). — С. 47—56.
7. Алешин А. М. Стратегия реализации плана осуществления первоочередных мероприятий на объекте «Укрытие» / А. М. Алешин, В. Н. Герасько, А. В. Носовский // Экология и атомная энергетика. — СПб, 2000. — Вып. 2. — С. 77—82.
8. Носовський А. В. Про стан та перспективи науково-технічного супроводу з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему / А. В. Носовський // Вісник Національної академії наук України. — Київ, 2017. — № 4. — С. 13—21.
9. Барьяхтар В. Г. О необходимости реформирования науки в Украине и создания научно-исследовательского института атомной энергетики / В. Г. Барьяхтар, А. А. Ключников, А. В. Носовский // Проблемы Чернобиля. — Чорнобиль, 2003. — Вып. 12. — С. 6—16.
10. Носовский А. В. О научно-техническом сопровождении атомной энергетики / А. В. Носовский // Энергетическая политика Украины. — Киев, 2004. — № 4. — С. 90—94.
11. Закон України «Про загальні засади подальшої експлуатації і зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблока цієї АЕС на

---

екологічно безпечну систему» : № 309-XIV від 11.12.98 р. / Відомості Верховної Ради України. — Київ, 1999. — № 4. — Ст. 33.

12. Стратегия дальнейшей реализации проекта НБК : SIP-P-PM-21-330-EXN-004-01. — Ред. 2 от 23.04.2004. — 27 с.

13. Панасюк Н. И. Оценка параметров радиоактивного загрязнения грунтов в районе объекта «Укрытие» / Н. И. Панасюк, А. М. Алферов, С. С. Подберезный, Г. В. Левин, И. А. Литвин // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — Київ, 2009. — Вип. 11. — С. 115—119.

14. Документ по безопасности в рамках концепции проекта ПК-1 НБК : SIP-N-LI-22-A500-CDS-001-01. — Ред. 1 от 04.12.2008. — Глава 2. — 257 с.

15. Городецкий Д. В. Радиационная обстановка в зонах производства работ по строительству восточной и западной стен ограждающего контура нового безопасного конфайнмента и прогноз ее изменения в ходе выполнения работ / Д. В. Городецкий, В. В. Деренговский, В. В. Егоров, Л. И. Павловский, А. А. Холодюк // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — Київ, 2015. — Вип. 24. — С. 118—126. — Бібліогр. : 3 назв. — рос.

16. Офіційний сайт Державного спеціалізованого підприємства «Чернобильська АЕС» [Електронний ресурс] : режим доступу : <http://chnpp.gov.ua>.

17. Пазухин Э. М. Лавообразные топливосодержащие массы 4-го блока Чернобыльской АЭС: топография, физико-химические свойства, сценарий образования, влияние на окружающую среду : дисс. д-ра техн. наук: 21.06.01 ; защищена 25.11.1999 ; утверждена 01.09.2001 / Пазухин Эдвард Михайлович ; ИПБ АЭС НАН Украины. — Чернобыль, 1999. — 293 с.

18. Гончар В. В. Динамика высокотемпературного взаимодействия аварийного ядерного топлива с конструкционными материалами РБМК / В. В. Гончар , А. В. Жидков // Проблемы Чернобиля. — 2002. — Вип. 9. — С. 25—33.

19. Жидков О. В. Електронні процеси в опромінених діелектриках та властивості композицій, що містять ядерне паливо: дис. д-ра фіз.-мат. наук: 01.04.07 ; захищена 28.02.2007 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради ; Д 35.156.01 / Жидков Олександр Володимирович ; Інститут фізики конденсованих систем Національної академії наук України. — Львів, 2007. — 443 с.

20. Лагуненко А. С. Изучение скрытых скоплений топливосодержащих материалов разрушенного 4-го блока Чернобыльской АЭС: дис. канд. техн. наук: 21.06.01 ; защищена 12.03.2009 ; утверждена 27.05.2009. / Лагуненко Александр Степанович ; ИПБ АЭС НАН Украины. — Киев, 2009. — 148 с.

21. Ядерное топливо в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС / Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов, А. А. Боровой, Е. П. Велихов, А. А. Ключников. — Москва : Наука, 2010. — 240 с.

22. Жидков О. В. 25 років еволюції уявлень про паливовмісні матеріали об'єкта «Укриття»: Сценарії утворення їх та фізичні міркування / О. В. Жидков // Проблемы Чернобиля. — 2011. — Вип. 16. — С. 86—100.

23. Высотский Е. Д. Концептуальная модель «дóменной» версти образования ядерно опасных скоплений на 4-м блоке ЧАЭС / Е. Д. Высотский, А. В. Михайлов // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2013. — Вип. 21. — С. 99—106.

---

24. Лагуненко А. С. Топливо в помещении 305/2. Возможный сценарий образования ядерно опасных зон / А. С. Лагуненко, В. А. Краснов, С. А. Довыдьков // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля: наук.-техн. зб. — 2015. — Вип. 24. — С. 51—61.

25. Справка о количестве ядерного топлива на энергоблоке № 4 Чернобыльской АЭС в момент аварии. Утверждена главным инженером ПО ЧАЭС 30.01.96 г. // ИПБ АЭС НАН Украины. Арх. № 3972. 1 с.

26. Исследование влияния изменений свойств топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» на его ядерную, радиационную и радиоэкологическую безопасность. Том 1: «Анализ процессов образования и поведения лавообразных топливосодержащих материалов при аварии на ЧАЭС»: отчет о НИР (заключит.) // ИПБ АЭС НАН Украины. — Инв. № 4003. — Чернобыль, 2011. — 124 с.

27. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации: отчет о НИР // МНТЦ «Укрытие». Арх. № 3836. 337 с. — Чернобыль, 2001.

28. Пазухин Э. М. Лавообразные топливосодержащие массы 4-го блока Чернобыльской АЭС: топография, физико-химические свойства, сценарий образования / Э. М. Пазухин // Радиохимия. — 1994. — Т. 36, № 2. — С. 97—142.

29. Боровой А. А. Новые оценки количества ядерного топлива, находящегося на нижних отметках объекта «Укрытие» / А. А. Боровой, А. С. Лагуненко, Э. М. Пазухин // Проблемы Чернобиля. — Чернобыль, 2000. — Вип. 6. — С. 13—16.

30. Розробка науково-технічних засад та обґрунтування принципів технологічних рішень щодо вилучення ПВМ із об'єкта «Укриття» з використанням майбутнього безпечного конфайнмента та створення відповідної інфраструктури для подальшого поводження з ними : звіт про НДР // ІПБ АЕС НАН України. Арх. № 4018. — Чернобыль, 2014. — 443 с.

31. Богатов С. А. База данных по местонахождению и состоянию ядерного топлива 4-го энергоблока ЧАЭС до и после аварии. Проект № 2916 «Разработка модели поведения ядерного топлива во время активной стадии аварии» / С. А. Богатов, А. А. Боровой, С. А. Гаврилов и др. — М., 2007. — 147 с. — (Препр. / РНЦ «Курчатовский институт»; № 130-11/2).

32. Киселев А. Н. Экспериментальные исследования лавообразных топливосодержащих масс (ТСМ) на 4-м блоке ЧАЭС / А. Н. Киселев, А. Ю. Ненаглядов, А. И. Сурин, К. П. Чечеров. — М., 1992. — 120 с. — (Препр. / ИАЭ им. И. В. Курчатова; ИАЭ-5533/3).

33. Киселев А. Н. Результаты дополнительных исследований мест скоплений ЛТСМ на 4-м блоке ЧАЭС / А. Н. Киселев, А. И. Сурин, К. П. Чечеров. — М., 1994. — 59 с. — (Препр. / ИАЭ им. И. В. Курчатова; ИАЭ-5783/3).

34. Техническое обоснование ядерной безопасности объекта «Укрытие»: отчет о НИР / С. Т. Беляев, А. А. Боровой, В. Г. Волков и др. // КЭ при ИАЭ им. И. В. Курчатова. — Чернобыль, 1990. — 160 с.

35. Экспертное заключение на материалы по оценке и прогнозу состояния ядерной и радиационной безопасности объекта «Укрытие» / ФЭИ, № 60/12 от 01.07.92. — 16 с.

36. Анализ ядерной безопасности объекта «Укрытие»: отчет / ИЯЭ АН БССР. Инв. № 1449. — Минск, 1990. — 80 с.

---

37. Состояние ядерной, радиационной и экологической безопасности объекта «Укрытие». (Сбор, верификация, представление информации, проведение дополнительных исследований) : отчет / С. А. Богатов, А. А. Боровой, С. А. Гаврилов и др. / ИВТЭМ РНЦ «Курчатовский институт». — Москва, 1995. — 120 с.

38. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации : отчет // МНТЦ «Укрытие» НАН Украины (выполнен по соглашению № 3, по теме № 4 генерального договора № 1/95 между ПО ЧАЭС и МНТЦ «Укрытие»). — Отв. исп. А. Боровой. Арх. № 3601. — Чернобыль, 1996. — 272 с.

39. Разработка методик и способов контроля состояния подкритичности топливосодержащих материалов, экспериментальное исследование эффективности критериев раннего обнаружения и технологии локального подавления подкритических аномалий : отчет о НИР // ИПБ АЭС НАН Украины ; Рук. А. А. Боровой ; № 3810. — Чернобыль, 2001. 129 с.

40. Скважины объекта «Укрытие». Обобщенные данные (альбом) : отчет / ОЯРБ МНТЦ «Укрытие». Инв. № 09/05-66 от 09.06.98 г. — Чернобыль, 1998. — 117 с.

41. Разработка мероприятий, повышающих ядерную, радиационную и экологическую безопасность объекта «Укрытие» и нового безопасного конфайнмента. Том 1: «Исследование нейтронно-физических и физико-химических характеристик ядерно опасных скоплений и разработка способов подавления их параметров критичности»: отчет о НИР (заклучит.) / ИПБ АЭС НАН Украины. — Инв. № 4021. — Чернобыль, 2015. — 127 с.

42. Бабенко В. А. Моделирование массовых и геометрических параметров скопления топливосодержащих материалов в юго-восточной части помещения 305/2 разрушенного 4-го блока ЧАЭС / В. А. Бабенко, Е. Д. Высотский, А. А. Ключников и др. // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — Київ, 2008. — Вип. 9. — С. 36—42.

43. Высотский Е. Д. Ядерно-опасные скопления топливосодержащих материалов в разрушенном четвертом блоке Чернобыльской АЭС / Е. Д. Высотский, А. А. Ключников, А. С. Лагуненко, Э. М. Пазухин, В. Н. Щербин // Радиохимия. — 2011. — Т. 53, № 2. — С. 178—183.

44. Результаты тепловых и радиационных измерений на ОУ за период 1988—1989 гг. : отчет / КЭ при ИАЭ им. И. В. Курчатова. Арх. № 1379 ; МНТЦ «Укрытие» НАН Украины. — Чернобыль, 1989. — 47 с.

45. Borovoy A. A. Post-Accident Management of Destroyed Fuel from Chernobyl : Analitical Report // IAEA, Work Material. — 1990. — P. 1—99.

46. Боровой А. А. Оценка количества топлива в подаппаратном помещении 305/2 4-го энергоблока ЧАЭС / А. А. Боровой, А. С. Лагуненко, Э. М. Пазухин // Атомная энергия. — 1998. — Т. 84. — Вып. 4. — С. 356—362.

47. Borovoy A. The Shelter Current Safety Analysis and Situation Development Forecasts (update version) / A. Borovoy et. all. // Tasis, European Commission, 1998. — 103 p.

48. Арзуманов С. С. Развитие системы нейтронного контроля на 4-ом энергоблоке ЧАЭС / С. С. Арзуманов, С. Т. Беляев, Л. Н. Бондаренко и др. — Москва, 1993. — 46 с. — (Препр. / Ин-т атомной энергии им. И. В. Курчатова ; ИАЭ-5626/3).



---

49. Технологический регламент объекта «Укрытие» реактора блока № 4 Чернобыльской АЭС (1Р-ОУ), инв. № 74 от 30.03.2011. — 71 с.

50. Оценка количества топлива в скоплениях ТСМ в подаппаратном помещении: отчет о НИР / КЭ при ИАЭ им. И. В. Курчатова. Инв. № 11.07/26. — Чернобыль, 1990. — 11 с.

51. Основные правила ядерной безопасности при переработке, хранении и транспортировании ядерно опасных делящихся материалов (ПБЯ-06-00-88) / ГИЯБ. — Москва. — 1988. — 35 с.

52. Разработка средств, повышающих радиационную и экологическую безопасность нового безопасного конфайнмента и объекта «Укрытие»: отчет о НИР, том 2 / ИПБ АЭС НАН Украины; инв. № 4021. — Чернобыль, 2015. — 190 с.

53. Одинцов А. А. Объемная активность трансурановых элементов в жидких радиоактивных отходах объекта «Укрытие», влияющих на ядерную и радиационную безопасность / А. А. Одинцов, В. Е. Хан, В. А. Краснов, В. Н. Щербин // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2008. — Вип. 9. — С. 80—93.

54. Жидков А. В. Топливосодержащие материалы объекта «Укрытие» сегодня: актуальные физические свойства и возможности прогнозирования их состояния / А. В. Жидков // Проблемы Чорнобиля. — 2001. — Вип. 7. — С. 23—40.

55. Данилевич А. Г. Окисление облученного топлива РБМК в воздушной среде / А. Г. Данилевич, Г. Ф. Чемерский // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2004. — Вип. 1. — С. 136—142.

56. Довгостроковий прогноз поведінки паливного пилу в об'єкті «Укриття»: проект 4207, заключний технічний звіт / НТЦУ. — Чорнобыль, 2011. — 177 с.

57. Исследование физико-химических свойств топливосодержащих материалов объекта «Укрытие»: (за матеріалами звітів про роботи, виконані в МНТЦ «Укриття» в 1997 р.; Арх. № 3723 і 3724) // Проблемы Чорнобиля. — 1998. — Вип. 3. — С. 33—35.

58. Барьяхтар В. Г. О пылегенерирующей способности аварийного облученного топлива и лавообразных топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» / В. Г. Барьяхтар, В. В. Гончар, А. В. Жидков, А. А. Ключников. — Чернобыль, 1997. — 20 с. — (Препр. / МНТЦ «Укрытие» НАН Украины; 97-10).

59. Ширяев А. А. Изучение диспергированных частиц лавообразных топливосодержащих материалов Чернобыльской АЭС / А. А. Ширяев, И. Э. Власова, Б. И. Огородников, М. С. Григорьев // Десятые Петряновские и Первые Фуковские чтения, 21—23 апреля 2015 г., Москва: тезисы докладов. — Москва: Государственный научный центр Научно-исследовательского физико-химического института им. Я. Я. Карпова Госкорпорации «Росатом», 2015. — С. 158—160.

60. SIP-EBPD-D-0108: Отчет по характеристизации топливосодержащих материалов Фазы 1 / ДСП ЧАЭС. — 2000. — 191 с.

61. Габелков С. В. Фазовий склад коричневої кераміки лавоподібних паливовмісних матеріалів об'єкта «Укриття» Чорнобильської АЕС / С. В. Габелков, І. В. Жиганюк, В. Г. Кудлай,

---

---

А. В. Носовський, П. Є. Пархомчук, С. О. Чиколовець, В. М. Щербін // Ядерна фізика та енергетика. — 2019. — Вип. 20. — С. 388—396.

62. Скорбун А. Д. Метод обробки даних рентгенівської дифракції для багатофазних матеріалів з низьким вмістом фаз / А. Д. Скорбун, С. В. Габелков, І. В. Жиганюк, В. Г. Кудлай, П. Є. Пархомчук, С. О. Чиколовець // Український фізичний журнал, 2019. — Вип. 9. — Т. 64. — С. 862—870.

63. Габелков С. В. Наноразмерные поровые каналы как составляющая порового пространства лавообразных топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» / С. В. Габелков, А. А. Ключников, Е. Е. Олейник и др. // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — Київ, 2014. — Вип. 22. — С. 70—75.

64. Габелков С. В. Природа формирования наноразмерных поровых каналов лавообразных топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» / С. В. Габелков, А. А. Ключников, П. Е. Пархомчук, Г. Ф. Чемерский // Вопросы атомной науки и техники. — 2015. — № 2(96). — Сер. ФРП и РМ (105). — С. 77—83.

65. Габелков С. В. Модель деградации лавообразных топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» / С. В. Габелков, А. В. Носовский, В. Н. Щербин // Проблеми безпеки атомних станцій і Чорнобиля. — 2016. — Вип. 26. — С. 75—84.

66. О научно-технических проблемах безопасности объекта «Укрытие»: Решение совместного заседания секции НТС Госспроматомнадзора СССР и Комиссии Госатомнадзора, № 12-91-НТС от 16.05.91.

67. Годун Р. Л. Оценка эффективности регламентной системы контроля ядерной безопасности комплекса НБК-ОУ / Р. Л. Годун, А. А. Дорошенко, Д. А. Муляр // Вопросы атомной науки и техники. — Харьков, 2020. — № 2(126). — С. 71—80.

68. Научно-техническое сопровождение на этапах введения в эксплуатацию и эксплуатации НБК-ОУ (аспекты ядерной и радиационной безопасности): отчет о НИР (заключит.) // ИПБ АЭС НАН Украины. — Чернобыль, 2018. — 124 с.

69. Экспертное заключение ГНТЦ ЯРБ № 08-10-4515 на «Отчет о состоянии безопасности объекта «Укрытие» // Государственный комитет ядерного регулирования Украины. — Київ, 2008. — 10 с.

70. Обеспечение ядерной безопасности объекта «Укрытие»: отчет ПО ЧАЭС, арх. № 216-ТВ, Славутич, 2009. — 50 с.

71. Звіт про стан безпеки об'єкта «Укриття» за 2018 рік // ВПОУ ДСП ЧАЕС. Арх. № 8-ТВ, Славутич, 2019. — 53 с.

72. Звіт про стан безпеки об'єкта «Укриття» за 2017 рік // ВПОУ ДСП ЧАЕС. Арх. № 6-ТВ, Славутич, 2018. — 56 с.

73. Звіт про стан безпеки об'єкта «Укриття» за 2016 рік // ВПОУ ДСП ЧАЕС. Арх. № 10-ТВ, Славутич, 2017. — 58 с.

74. Контроль неорганизованных выбросов из ОУ (заключит. отчет, договор 177/05) / Ин-т проблем безопасности АЭС, 2005. — 86 с.

---

75. Высотский Е. Д. Нейтронная активность скоплений лавообразных топливосодержащих материалов на 4-ом блоке ЧАЭС / Е. Д. Высотский, Р. Л. Годун // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — Київ, 2015. — Вип. 25. — С. 108—115.

76. Одинцов А. А. Радиоактивно загрязненная вода в помещениях объекта «Укрытие» / А. А. Одинцов, В. Е. Хан, В. А. Краснов, В. Н. Щербин, М. Н. Яковенко // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — Київ, 2014. — Вип. 23. — С. 89—101.

77. Высотский Е. Д. Эффективность нейтронного контроля и ядерная безопасность объекта «Укрытие» / Е. Д. Высотский, В. А. Краснов, А. А. Ключников // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — Київ, 2006. — Вип. 5. — С. 138—150.

78. Научно-техническое сопровождение на этапах введения в эксплуатацию и эксплуатации НБК-ОУ (аспекты ядерной и радиационной безопасности) : отчет о НИР (заключит.) / ИПБ АЭС НАН Украины. (договор № 377/18. 2018 г., госрегистрация № 0118U001405). — Черновобиль, 2018. — 175 с.

79. Высотский Е. Д. Экспертная оценка текущего уровня подкритичности скоплений топливосодержащих материалов в объекте «Укрытие» после установки нового безопасного конфайнмента / Е. Д. Высотский, К. А. Сущенко, Р. Л. Годун // Ядерна енергетика та довкілля. — 2020. — № 1(16). — С. 49—55.

80. Єгоров В. В. Зміна радіаційних умов на об'єкті «Укриття» після встановлення арочної конструкції у проектне положення / В. В. Єгоров, Ю. В. Морозов, Л. І. Павловський, А. О. Холодчук // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — Київ, 2017. — Вип. 28. — С. 75—81.

81. Пат. 51987 Україна, МПК7 G01T 1/28. Пристрій для вимірювання кутового розподілу інтенсивності гамма-випромінювання / В. Г. Батій, В. В. Єгоров, Ю. А. Закревський, О. О. Ключников, М. О. Кочнев, В. О. Кузьменко, В. М. Рудько, А. О. Сізов, В. М. Щербін ; заявник і власник патенту МНТЦ «Укриття» НАН України. — № 2001128567 ; заявл. 13.12.2001 ; опубл. 15.07.2004, Бюл. № 7/2004.

82. Програма науково-технічного супроводу на етапах введення в експлуатацію та експлуатації НБК-ОУ // ДСП ЧАЕС, інв. № 16 від 22.12.2016 р. — 28 с.

83. Новиков А. Е. Измерение МЭД в ближней зоне НБК для оценки эффективности противорадиационной защиты / А. Е. Новиков, С. В. Шаршун, Л. В. Яковенко, Е. В. Стромко, А. Ю. Евстигнеев // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — Київ, 2019. — Вип. 32. — С. 67—73.

84. SIP K 01 21 310 MR1 003 01. Задача 1: Измерения надземных полей гамма-излучения. Фаза 1. Отчет по измерениям / Консорциум КСК, Украина, 2003. — 102 с.

85. SIP K 01 21 310 MR2 003 02. Задача 1: Измерения надземных полей гамма-излучения. Фаза 2. Отчет по измерениям / Консорциум КСК, Украина, 2004. — 211 с.

86. Лицензионный пакет 6 (ЛП-6). Проект «Защитное сооружение с технологическими системами жизнеобеспечения и необходимой инфраструктурой» : Отчет о соответствии требованиям санитарного законодательства ; SIP-N-LI-22-E002-SCR-002-01/LCO-NKA-NSC-017-1-RU. — Славутич, 2012. — 277с.

---

87. Огородников Б. И. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие»: 1986—2006 гг. : монография / Б. И. Огородников, Э. М. Пазухин, А. А. Ключников ; ИПБ АЭС НАН Украины. — Чернобыль, 2008. — 456 с.

88. Задание 10. Обращение с пылью. План по описанию свойств пыли. SIP-03/1/C01. Документ № TN/00101 / Чернобыльская АЭС, 1999. — 83 с.

89. Получение экспериментальных данных для определения современного состояния пылевого загрязнения и проведение количественных оценок последствий радиационной аварии на объекте «Укрытие»: отчет по второму этапу договора 78/96 ; ГР № 0197U006055 / ТО ОУ, инв. № 1432. — Чернобыль, 1997. — 36 с.

90. Богатов С. А. Оценка запасов и определение свойств пылевого загрязнения в подкровельном пространстве объекта «Укрытие» / С. А. Богатов, А. А. Боровой. — Чернобыль, 2000. — 16 с. — (Препр. / НАН Украины. МНТЦ «Укрытие» ; 00-2).

91. SIP-P-PM-22-460-SAR-124-05. Отчет о состоянии безопасности объекта «Укрытие», ред. 5 / ДСП ЧАЭС, 2008. — 436 с.

92. Kashparov V. A. Formation of Hot Particles During the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident / V. A. Kashparov, Yu. A. Ivanov, S. I. Zvarich, V. P. Protsak, Yu. V. Khomutinin, A. D. Kurepin, E. M. Pazukhin // Nuclear Technology. — 1996. — Vol. 114. — № 1. — P. 246—253. — <https://doi.org/10.13182/NT96-A35253>.

93. Kashparov V. A. Dissolution Kinetics of Particles of Irradiated Chernobyl Nuclear Fuel: Influence of pH and Oxidation State on the Release of Radionuclides in Contaminated Soil of Chernobyl / V. A. Kashparov, V. P. Protsak, N. Ahamdach, D. Stammose, J. M. Peres, V. I. Yoschenko, S. I. Zvarich // Journal of Nuclear Materials. — Vol. 279. — 2000. — P. 225—233.

94. Kashparov V. A. Kinetics of Fuel Particle Weathering and  $^{90}\text{Sr}$  Mobility in the Chernobyl 30-km Exclusion Zone / V. A. Kashparov, D. H. Oughton, S. I. Zvarich, V. P. Protsak, S. E. Levchuk // Health Physics. — 1999. — Vol. 76. — № 3. — P. 251—259.

95. Ключников О. О. Морфология частиц ядерного топлива чернобыльского выброса / А. А. Ключников, В. Б. Рыбалка, Г. И. Петелин и др. // Перший незалежний науковий вісник. — № 4-1. — 2015. — С. 82–88.

96. Фрост Б. Твэлы ядерных реакторов / Б. Фрост. — Москва : Энергоатомиздат, 1986. — 240 с.

97. Тепикин В. Е. «Горячие» частицы уран-циркониевого состава Чернобыльской аварии / В. Е. Тепикин, С. И. Рыбалка и др. — Чернобыль, 1993. — 19 с. — (Препр. / НПО «Припять»).

98. Контроль неорганизованных выбросов из объекта «Укрытие» и аэрозольной обстановки во время строительства НБК : отчет (ГР № 0116U007397. Инв. № 02170002045) / ИПБ АЭС НАН Украины. — Чернобыль, 2016. — 199 с.

99. Лагуненко А. С. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2015—2016 гг. / А. С. Лагуненко, В. Е. Хан, А. К. Калиновский и др. // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобіля. — Київ, 2017. — Вип. 29. — С. 69—77.

---

100. Комплексна оцінка сукупних впливів на навколишнє середовище радіаційно небезпечних об'єктів чорнобильської зони відчуження : звіт про НДР (част. 2) / ІПБ АЕС НАН України. — Чорнобиль, 2020. — 888 с.

101. Лагуненко А. С. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в условиях нового безопасного конфайнмента в 2017 г. / А. С. Лагуненко, В. Е. Хан, А. К. Калиновский и др. // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — Київ, 2018. — Вип. 31. — С. 68—75.

102. Лагуненко О. С. Радиоактивні аерозолі в умовах нового безпечного конфайнмента у 2018 р. / О. С. Лагуненко, В. Є. Хан, О. К. Калиновський та ін. // Ядерна енергетика та довкілля. — Київ, 2020. — Вип. 3. — С. 79—85.

103. Исследование влияния изменений свойств топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» на его ядерную, радиационную и радиоэкологическую безопасность. Том 2: «Изучение поведения топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» как фактора ядерной, радиационной и радиоэкологической опасности под воздействием внешних и внутренних факторов» : отчет о НИР (заключит.) / ИПБ АЭС НАН Украины. — Инв. № 4003. — Чернобыль, 2011. — 216 с.

104. Огородников Б. И. Аэрозоли — свидетели разрушения лавообразных топливосодержащих материалов в объекте «Укрытие» / Б. И. Огородников, В. Е. Хан, В. П. Ковальчук // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2013 — Вип. 20. — С. 94—106.

105. Огородников Б. И. Характеристики радиоактивных аэрозолей около скопления лавообразных топливосодержащих материалов в помещении 012/15 объекта «Укрытие» в 2014 г. / Б. И. Огородников, В. Е. Хан, В. П. Ковальчук // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2015. — Вип. 25. — С. 125—138.

106. Огородников Б.И., Хан В.Е., Ковальчук В.П. и др. Состав и концентрации радиоактивных аэрозолей около скопления лавообразных топливосодержащих материалов в помещении 210/7 объекта «Укрытие» // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2015. — Вип. 24. — С. 70—84.

107. Лагуненко А. С. Радиоактивные аэрозоли около скопления лавообразных топливосодержащих материалов в помещении 012/7 объекта «Укрытие» в 2017—2018 гг. / А. С. Лагуненко, В. Е. Хан, А. А. Одинцов, В. П. Ковальчук, Т. А. Кравчук, А. К. Калиновский, В. А. Кашпур, А. А. Свирид, А. В. Ткач, С. В. Юрчук // Ядерна енергетика та довкілля. — Київ, 2019. — Вип. 1 (13). — С. 83—90. — DOI: 10.31717/2311-8253.19.1.10.

108. Лагуненко А. С. Радиоактивные аэрозоли около скопления лавообразных топливосодержащих материалов в помещении 012/15 объекта «Укрытие» в 2017—2018 гг. / А. С. Лагуненко, В. Е. Хан, А. А. Одинцов, А. К. Калиновский, В. П. Ковальчук, Т. А. Кравчук, А. В. Филиппов, М. Н. Попов // Ядерна енергетика та довкілля. — Київ, 2019. — Вип. 2 (14) — С. 31—38.

109. Лагуненко А. С. Радиоактивные аэрозоли около скопления лавообразных топливосодержащих материалов в помещении 210/7 объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС в 2017—2018 гг. / А. С. Лагуненко, В. Е. Хан, А. К. Калиновский, В. А. Кашпур, В. П. Ковальчук,



---

П. В. Сабенин, А. А. Свирид, А. В. Ткач, С. В. Юрчук // Ядерна енергетика та довілля. — Київ, 2020. — Вип. 2(17). — С. 58—67. — doi.org/10.31717/2311-8253.20.2.7.

110. Габелков С. В. Радиационно стимулированное фазообразование в лавообразных топливосодержащих материалах 4-го блока ЧАЭС / С. В. Габелков, И. В. Жиганюк, В. Г. Кудлай, П. Е. Пархомчук, А. Д. Скорбун, С. А. Чиколовец // XXVI щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України (8—12 квітня 2019 р., Київ) : тези доповідей. — Київ : Ін-т ядерних дослідж., 2019. — Режим доступу: [http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2019/r\\_gabelkov.html](http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2019/r_gabelkov.html).

111. Боровой А. А. Итоги работы последних лет / А. А. Боровой, В. А. Краснов // Проблемы Чернобиля. — Чернобыль, 2001. — Вип. 7. — С. 51—64.

112. Увеличивающаяся опасность объекта «Укрытие» [Электронный ресурс] / ИБРАЭ. — Режим доступа: <http://www.ibrae.ac.ru/contents/202/>. — Дата обращения 25.02.2021. — Название с экрана.

113. Старостин Александр. Чернобыль ч. 9.1. «Работа в условиях кардинальных изменений» [Электронный ресурс] / Александр Старостин. — Режим доступа: [https://pikabu.ru/story/chernobyil\\_ch91\\_rabota\\_v\\_usloviyakh\\_kardinalnyikh\\_izmeneniy\\_7370149](https://pikabu.ru/story/chernobyil_ch91_rabota_v_usloviyakh_kardinalnyikh_izmeneniy_7370149). — Дата обращения 25.02.2021. — Название с экрана.

114. Одинцов А. А. Трансурановые элементы в жидких радиоактивных отходах объекта «Укрытие» / А. А. Одинцов, В. Е. Хан, В. А. Краснов, Э. М. Пазухин, В. Н. Щербин // Радиохимия. — 2009. — Т. 51, № 4. — С. 337—343.

115. Одинцов А. А. Содержание 129I в радиоактивно загрязненной воде объекта «Укрытие» / А. А. Одинцов, В. Е. Хан, А. К. Калиновский // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2015. — Вип. 24. — С. 62—69.

116. Одинцов А. А. Многолетний мониторинг неорганизованных скоплений жидких радиоактивных отходов объекта «Укрытие» / А. А. Одинцов, В. Е. Хан, В. А. Краснов, В. Н. Щербин // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2016. — Вип. 27. — С. 43—57.

117. Одинцов А. А. Радиоактивно загрязненная вода в объекте «Укрытие» после установки «Арки» НБК в проектное положение / А. А. Одинцов, В. Е. Хан // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2018. — Вип. 30. — С. 67—77.

118. Богатов С. А. Исследования водопотоков внутри объекта «Укрытие» / С. А. Богатов, А. А. Корнеев, А. П. Криницын, О. Л. Стрихарь, В. Н. Щербин // Радиохимия. — 2000. — Т. 42, № 3. — С. 276—280.

119. Криницын А. П. Проблема обращения с жидкими радиоактивными отходами объекта «Укрытие» / А. П. Криницын, О. Л. Стрихарь, В. Н. Щербин // Радиохимия. — 2003. — Т. 45, № 5. — С. 461—465.

120. Носовский А. В. Оценка радиоактивного состояния подземных вод в районе Чернобыльской АЭС / А. В. Носовский, А. Л. Кононович, Б. Я. Осколков и др. // Атомная энергия. — 1994. — Т. 77. — Вып. 5. — С. 386—391.

121. Носовский А. В. Влияние объекта «Укрытие» на окружающую среду / А. В. Носовский, Б. Я. Осколков, А. А. Корнеев: Материалы 2-й междунар. науч.-практ. конф.,

---

---

посвященной 10-й годовщине завершения работ по строительству объекта «Укрытие» // Огни Славутича. — 1997. — С. 59—67.

122. Носовский А. В. Радиоактивное загрязнение окружающей среды Am-241 вследствие аварии на Чернобыльской АЭС / А. В. Носовский, Е. А. Иванов, Л. П. Хамьянов и др. // Атомная энергия. — 1994. — Т. 77. — Вып. 2. — С. 140—145.

123. Корнеев А. А. Проблемы экологии объекта «Укрытие» / А. А. Корнеев, А. В. Носовский, Б. Я. Осколков // Проблемы Чернобиля : наук.-техн. зб. МНТЦ «Укриття». — Киев: Укратомиздат, 1999. — Вып. 5. — С. 117—123.

124. Носовский А. В. Радиационная опасность лесных пожаров / А. В. Носовский, В. Н. Васильченко, Е. А. Иванов и др. // Сборник докладов научной конференции «Проблемы радиационной эпидемиологии медицинских последствий аварии на ЧАЭС». — Киев: НПФ «Дніпро», 1993. — С. 323—325.

125. Носовский А. В. Прогнозное и эпигнозное моделирование изменений гидродинамических условий промплощадки ЧАЭС / А. В. Носовский, С. П. Джепо, А. С. Скальский и др. // Проблемы Чернобыльской зоны отчуждения : науч.-техн. сб. — Киев : Наук. думка, 1997. — Вып. 7. — С. 56—77.

126. Носовський А. В. Радіогідрогеологічний моніторинг об'єкта Укриття в зв'язку з виведенням ЧАЕС із експлуатації / А. В. Носовський, Д. О. Бугай, С. П. Джепо та ін. // Екологія підприємств ядерного циклу : збірн. тез. доповід. міжнар. конф. УкряТ ; за ред. С. В. Барбашева. — Одеса: Астропринт, 1998. — С. 40.

127. Носовський А. В. Деякі результати радіогідрогеологічного моніторингу об'єкта «Укриття» / А. В. Носовський, С. П. Джепо, А. С. Скальський та ін. // Бюл. екол. стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. — Чорнобиль: Чорнобиль-інтерінформ, 1999. — № 14. — С. 19—21.

128. SIP-P-PM-22-460-SAR-124-05. Отчет о состоянии безопасности объекта «Укрытие», ред. 5 / ДСП ЧАЭС, 2008. — 436 с.

129. Боровой А. А. Определение ядерно-физических характеристик топлива 4-го энергоблока ЧАЭС : отчет / А. А. Боровой, А. А. Довбенко, М. В. Смолянкина, А. А. Строганов / ИБРАЭ АН СССР. Инв. № 52/11-20. — Москва, 1991. — 140 с.

130. Бегичев С. Н. Топливо реактора 4-го блока ЧАЭС. Краткий справочник / С. Н. Бегичев, А. А. Боровой, Е. В. Бурлаков и др. — Москва, 1990. — 21 с. — (Препр. / Ин-т атомной энергии им. И. В. Курчатова ; 5268/3).

131. Кашпаров В. О. Викид та забруднення території радіонуклідами у складі паливних часток / В. О. Кашпаров, С. М. Лундін, С. І. Зварич та ін. // Бюлетень екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. — Київ : Чорнобиль-інтерінформ, 2002. — № 2. — С. 22—32.

132. Калиновский А. К. Фракционирование радионуклидов в аэрозолях локальной зоны объекта «Укрытие» по результатам радиохимического выделения / А. К. Калиновский, А. А. Одинцов, Л. Б. Чикур // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — Київ, 2016. — № 26. — С. 90—96.

---

133. Калиновский А. К. Радиоактивные аэрозоли в локальной зоне объекта «Укрытие» в 2009—2010 гг. / А. К. Калиновский, Б. И. Огородников, В. А. Краснов // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — Київ, 2011. — № 17. — С. 106—111.

134. Калиновський О. К. Удосконалення моніторингу радіоактивних аерозолів у локальній зоні об'єкта «Укриття» на етапі спорудження нового безпечного конфайнмента «Арка»: автореф. дис. канд. техн. наук: 21.06.01. / Калиновський О. К.; ІПБ АЕС НАН України. — Київ, 2017. — 24 с.

135. Панасюк М. І. Рівні радіоактивного забруднення підземних вод проммайданчика Чорнобильської АЕС та засоби обмеження його розповсюдження / М. І. Панасюк, Д. Т. Матросов, Г. В. Левін, П. А. Люшня, М. О. Сізов, Л. А. Паламар, І. П. Онищенко // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чернобиля. — Київ, 2018. — Вип. 30. — С. 87—92.

136. Панасюк М. І. Зміна радіогідроекологічних умов під впливом установа «Арки» над об'єктом «Укриття» Чорнобильської АЕС / М. І. Панасюк, Н. В. Сосонна, І. О. Коваленко, П. А. Люшня, Г. В. Левін, Л. А. Паламар, Л. Б. Чикур, І. П. Онищенко // Ядерна енергетика та довкілля. — 2019. — Вип. 3(15). — С. 82—89.

137. Панасюк М. І. Закономірності розподілу урану в підземних водах проммайданчика Чорнобильської АЕС / М. І. Панасюк, І. А. Литвин // Ядерна фізика та енергетика. — 2017. — Т. 18, № 1. — С. 56—62.

138. Панасюк М. І. Результати радіогідроекологічного моніторингу в районі комплексу НБК-ОУ та засоби зменшення забруднення підземних вод / М. І. Панасюк, О. І. Стоянов, П. А. Люшня, Г. В. Левін, Л. А. Паламар, І. П. Онищенко // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чернобиля. — Київ, 2019. — Вип. 32. — С. 74—79.

139. Концептуальное техническое решение «О системе мер по мониторингу состояния и поведения ТСМ», редакция № 3 с учетом указаний ЕБРР (КНК 096279) и рекомендаций МКГ (IAG-09/3) / ГУП ПОМ ДСП ЧАЭС. — Славутич, 2009. — 16 с.

140. Институт проблем безопасности атомных электростанций НАН Украины: 25 лет : Научно-популярное издание / А. В. Носовский, К. А. Байлюк, О. В. Балан и др.; под. общ. ред. А. В. Носовского. — Киев: ИПБ АЭС НАН Украины, 2017. — 416 с.

141. Про загальнодержавну програму зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему : Закон України № 886-VI від 15.01.2009 [Електронний ресурс] / Верховна Рада України ; Законодавство України. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/886-17#Text>.

142. Стельмах Д. А. Аналіз необхідності актуалізації стратегії перетворення об'єкта «Укриття» / Д. А. Стельмах, С. Ф. Сверчков, Л. Є. Шумилова, В. Ю. Дилдін // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чернобиля. — Київ, 2016. — Вип. 27. — С. 35—42.

143. Про поводження з радіоактивними відходами : Закон України № 256/95-ВР від 30.06.95 [Електронний ресурс] / Верховна Рада України ; Законодавство України. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/255/95-%D0%B2%D1%80#Text>.

144. Норми радіаційної безпеки України НРБУ-97/Д-2000 (доповнення). Радіаційний захист від джерел потенційного опромінення ; затверджено постановою Головного державного санітарного лікаря України № 116 від 12.07.2000. — Київ. — 80 с.

---

145. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України № 39/95-ВР від 08.02.95 [Електронний ресурс] / Верховна Рада України ; Законодавство України. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80#Text> .

146. Угода між Україною та Міжнародним агентством з атомної енергії про застосування гарантій у зв'язку з Договором про нерозповсюдження ядерної зброї, ратифікована Законом України № 737/97 від 17.12.97 // Відомості Верховної Ради України від 17.04.98. — 1998. — № 16, ст. 71.

147. Про ратифікацію Додаткового протоколу до Угоди між Україною і Міжнародним агентством з атомної енергії про застосування гарантій згідно з Угодою про нерозповсюдження ядерної зброї : Закон України № 3092-IV від 16.11.2005 р. // Відомості Верховної Ради України, 2006. — № 2-3, ст. 45.

148. Положення про державну систему обліку і контролю ядерних матеріалів № 1525-96-п, затверджене постановою Кабінету Міністрів України № 1525 від 18.12.96 (із змінами, внесеними згідно з постановами Кабінету Міністрів України № 1006 від 09.08.2001 і № 257 від 25.03.2009) [Електронний ресурс] / Верховна Рада України ; Законодавство України. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1525-96-%D0%BF#Text> .

149. Кафтанатіна О. А. Проблеми обліку ядерних матеріалів при перетворенні об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему / О. А. Кафтанатіна, С. А. Паскевич // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — Київ, 2018. — Вип. 31. — С. 109—113.

150. Загальні положення безпеки зняття з експлуатації ядерних установок, затв. наказом Державної інспекції ядерного регулювання України № 440 від 28.10.2020, зареєстр. в Міністерстві юстиції України 30.12.2020. за № 1311/35594 // Офіційний вісник України від 15.01.2021. — 2021. — № 4. — С. 676.

151. Про затвердження загальних положень щодо безпеки атомних станцій (НП 306.2.141-2008) / Держатомрегулювання, наказ № 164 від 19.11.2007 // Офіційний вісник України від 15.02.2008. — 2008. — № 9. — С. 28.

152. Правила ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском (НП 306.2.145-2008) / Держатомрегулювання, наказ № 73 від 05.04.2008 // Офіційний вісник України від 23.06.2008. — 2008. — № 43. — С. 138.

153. Основні положення забезпечення безпеки проміжних сховищ відпрацьованого ядерного палива сухого типу (НП 306.2.105-2004) / Держатомрегулювання, наказ № 198 від 29.12.2004 // Офіційний вісник України від 04.02.2005. — 2005. — № 3. — С. 202.

154. Про затвердження Загальних положень безпеки ядерної підкритичної установки (НП 306.2.183-2012) / Держатомрегулювання, наказ № 56 від 12.03.2012 // Офіційний вісник України від 18.05.2012. — 2012. — № 35. — С. 35.

155. Правила безпечного перевезення радіоактивних матеріалів (ПБПРМ-2020) / Держатомрегулювання України, наказ № 436 від 27.10.2020 [Електронний ресурс] // Платформа: ЛігаЗакон ; Законодавство України. — Режим доступу: [http://search.ligazakon.ua/l\\_doc2.nsf/link1/RE35596.html](http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE35596.html) .

---

156. Про затвердження Вимог безпеки під час поводження з ядерним паливом / Держатомрегулювання України, наказ № 269 від 21.06.2019 // Офіційний вісник України від 20.08.2019. — 2019. — № 63. — С. 241.

157. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України (ОСПУ-2005) / Міністерство охорони здоров'я України, наказ № 54 від 02.02.2005 ; зареєстр. Мінюст 20.05.2005 р. за №552/10832 // Офіційний вісник України від 24.06.2005. — 2005. — № 23. — С. 197.

158. Алексеева З. М. Деякі актуальні питання поводження з радіоактивними відходами на майданчику Чорнобильської АЕС / З. М. Алексеева, Г. П. Борозенець, А. В. Носовський, А. О. Павленко // Ядерная и радиационная безопасность. — Киев, 2006. — Т. 9. — Вып. 1. — С. 70—78.

159. Поводження з радіоактивними відходами : [Монографія] / А. В. Носовський, В. М. Васильченко, А. О. Павленко та ін. ; за ред. А. В. Носовського. — Київ : Техніка, 2007. — 368 с.

160. Classification of Radioactive Waste : Safety Guide. — Vienna : IAEA, 2009. — 68 p. — (IAEA Safety Standards, No. GSG-1).

161. Проскура Н. И. Схема классификации радиоактивных отходов для обеспечения долгосрочной безопасности захоронения / Н. И. Проскура, В. М. Шестопалов, Л. И. Зинкевич, Ю. А. Шибецкий, З. М. Алексеева, Е. И. Жебровская // Ядерная та радіаційна безпека. — Київ, 2014. — Вып. 2(62). — С. 37—43.

162. Проскура Н. И. Оценка эффективности внедрения в Украине новой схемы классификации радиоактивных отходов / Н. И. Проскура, В. М. Шестопалов, Л. И. Зинкевич, Ю. А. Шибецкий, З. М. Алексеева, Е. И. Жебровская // Ядерная та радіаційна безпека. — Київ, 2015. — Вып. 1(65). — С. 34—40.

163. Батий В. Г. Энерговыделение топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» / В. Г. Батий, А. А. Сизов, А. А. Холодюк // XIII конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям ННЦ ХФТИ, 16—20 марта 2015 г., Харьков : тезисы докладов / ННЦ ХФТИ. — Харьков. — 2015. — С. 60.

164. Про внесення змін до деяких законів України щодо вдосконалення законодавства у сфері поводження з радіоактивними відходами : Закон України № 208-IX від 17.10.2019 // Відомості Верховної Ради України від 13.12.2019. — 2019. — № 50. — С. 56.

165. Проектные критерии и требования к инфраструктуре НБК для демонтажа нестабильных конструкций объекта «Укрытие» (SIP 031 003 07 DCR 001 05). — Славутич, 2009. — 156 с.

166. Методология переоценки состава нестабильных конструкций ОУ, подлежащих «раннему» демонтажу (SIP09-2-001 NI 03 RPT 036 06). — Славутич, 2013. — 13 с.

167. Отчет о переоценке состава нестабильных конструкций ОУ, подлежащих «раннему» демонтажу (SIP 09-2-001 NI 03 RPT 037 05). — Славутич, 2014. — 32 с.

168. Балан О. В. Концептуальні рішення щодо демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» / О. В. Балан, С. А. Паскевич, М. В. Пашинов, С. С. Підберезний, В. М. Рудько // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — Київ, 2019. — Вып. 32. — С. 15—21.



---

169. Деренговський В. В. Результати порівняльного аналізу «доз — витрат — вигоди» для двох варіантів «раннього» демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта Укриття» / В. В. Деренговський, В. М. Рудько, В. О. Говоров // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — Київ, 2015. — Вип. 25. — С. 94—101.

170. Раскрепление схемы «Е» / ВНИПИЭТ (исполнитель НИКИЭТ) ; Договор 13/2104 ; Инв. № 90-13096. — ВНИПИЭТ, 1990. — 36 с.

171. Реконструкція об'єкта «Укриття» ДСП ЧАЕС в частині демонтажу металевої ферми підсилення південної покрівлі. Том 6. Звіт з аналізу безпеки (301503.201.006-ЗАБ/ІПБ АЕС НАНУ) / ІПБ АЕС НАН України, 2016. — 144 с.

172. Реконструкція об'єкта «Укриття» ДСП ЧАЕС в частині демонтажу металевої ферми підсилення південної покрівлі. Том 7. Звіт про відповідність вимогам санітарного законодавства (301503.201.007-ЗВСЗ/ІПБ АЕС НАНУ) / ІПБ АЕС НАН України, 2016. — 115 с.

173. Контрольные уровни радиационной безопасности, 41П-С, инв. № 12 / ПТС ДСП ЧАЭС. — 2012. — 20 с.

174. Балан О. В. Варіанти вирішення проблеми частин об'єкта «Укриття», що виступають за межі нового безпечного конфайнмента / О. В. Балан, С. Г. Брилка, В. В. Деренговський, Л. І. Павловський, В. М. Рудько, Д. О. Хоменко // Ядерна енергетика та довкілля. — 2020. — Вип. 4(19). — С. 57—65.

175. Деренговський В. В. Удосконалений метод багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями : автореф. дис. канд. техн. наук : 21.06.01 / В. В. Деренговський ; НАН України, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій. — Київ, 2019. — 24 с.

176. Деренговський В. В. Удосконалений метод багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями / В. В. Деренговський, А. В. Носовський // Ядерна фізика та енергетика, 2018. — Т. 19. — Вип. 2. — С. 166—172.

177. Деренговский В. В. Методика проведения сравнительного анализа «доз — затрат — выгод» для двух вариантов «раннего» демонтажа нестабильных конструкций объекта «Укрытие» / В. В. Деренговский, В. М. Рудько, В. А. Говоров // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — Київ, 2015. — Вип. 24. — С. 110—117.

178. Стратегия извлечения ТСМ и обращения с РАО : Решение П7 НАЭК «Энергоатом», № SIP-PMU P7 // ГСП ЧАЭС. — 2000. — 18 с.

179. Решение по прототипу извлечения топливосодержащих материалов. П9 // НАЭК «Энергоатом». — Киев, 2001.

180. Стратегия обращения с ТСМ и радиоактивными отходами объекта «Укрытие». План дальнейших действий. SIP-P-D1-19-120-STG-083-02. — Славутич, 2005. — 23 с.

181. Батий В. Г. Перспективы извлечения топливосодержащих материалов из объекта «Укрытие» с использованием систем нового безопасного конфайнмента / В. Г. Батий, С. С. Подберезный, В. М. Рудько и др. // Проблеми безпеки атомних станцій і Чорнобиля. — 2007. — Вип. 7. — С. 76—84.

---

182. Батий В. Г. Модельный эксперимент по извлечению топливосодержащих материалов из объекта «Укрытие» / В. Г. Батий, А. И. Стоянов, А. В. Щулепникова // VI международная конференция «Сотрудничество для решения проблемы отходов», 8—9 апреля 2009 г., Харьков : материалы конф. — Харьков, 2009. — С. 38—40.

183. Батий В. Г. Проблемы извлечения топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» / В. Г. Батий, А. С. Лагуненко, С. С. Подберезный, А. В. Щулепникова // Міжнародна науково-технічна конференція рятувників «Проблеми поводження з радіоактивними відходами в Україні», 22—23 вересня 2010 р., Київ : матеріали конф. — Київ, 2010. — С. 23—28.

184. Токаревский В. В. Стратегия извлечения топливосодержащих материалов из объекта «Укрытие» / В. В. Токаревский // Ядерна та радіаційна безпека. — Київ, 2012. — Т. 55, вип. 3. — С. 43—47.

185. Токаревский В. В. Технологии извлечения топливосодержащих материалов из объекта «Укрытие» / В. В. Токаревский // Ядерна та радіаційна безпека. — Київ, 2012. — № 4(56). — С. 48—52.

186. Батий В. Г. Анализ возможных путей обращения с топливосодержащими материалами после завершения строительства нового безопасного конфайнмента / В. Г. Батий, В. Н. Щербин, А. В. Щулепникова // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — Київ, 2014. — Вип. 23. — С. 32—44.

187. Батий В. Г. Майбутнє об'єкта «Укриття» після створення Арки / В. Г. Батий, С. А. Паскевич, В. М. Рудько, А. О. Сізов, В. М. Щербін // Проблеми Чорнобильської зони відчуження. — Славутич, 2016. — Вип. 15—16. — С. 4—13.

188. Батий В. Г. Комп'ютерне моделювання при експлуатації та перетворенні об'єкта «Укриття» / В. Г. Батий, С. С. Підберезний, В. М. Рудько, В. М. Щербін // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — Київ, 2016. — Вип. 27. — С. 67—79.

189. Балан О. В. Принципові технологічні рішення із вилучення паливовмісних матеріалів з верхніх відміток об'єкта «Укриття» / О. В. Балан, В. Г. Батий, В. М. Рудько та ін. // Проблеми безпеки атомних станцій і Чорнобиля. — Київ, 2015. — Вип. 25. — С. 83—93.

190. Носовський А. В. Про стратегічні напрями діяльності з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему після введення в експлуатацію нового безпечно-го конфайнмента / А. В. Носовський // Вісник Національної академії наук України. — Київ, 2018. — Вип. 7. — С. 16—24.

191. Балан О. В. Особливості вилучення паливовмісних матеріалів із нижніх позначок об'єкта «Укриття» / О. В. Балан, В. Г. Батий, С. С. Підберезний, В. М. Рудько // Проблеми безпеки атомних станцій і Чорнобиля. — 2018. — Вип. 31. — С. 76—84.

192. B462 Waste Encapsulation Plant. Pre-Construction Safety Report / Harwell Nuclear Facilities Department. — TR/Z805/017. — NUCEM. — 2006. — 108 p.

---

---

## REFERENCES

1. Nosovskiy A. V., Vasilchenko V. N., Klyuchnikov A. A., Prister B. S. (2006). *Avariya na Chernobyl'skoi AES: opyt preodoleniya, izvlechennye uroki* [The accident at the Chornobyl nuclear power plant: Experience to overcome. Lessons learned]. Kyiv: Tekhnika, 264 p. (in Russ.)
2. Nosovskiy A. V. (2006). Z dosvidu orhanizatsii robit pry budivnytstvi obiekta "Ukryttia" Chornobyl'skoi AES u 1986 rotsi [On the experience of organizing work on the construction of the Shelter object of the Chornobyl NPP in 1986]. *Bezpeka ta nerozpovsiudzhennia* [Security and non-proliferation], vol. 18, no. 6, pp. 2—9. (in Ukr.)
3. Gerasko V. N., Klyuchnikov A. A., Korneev A. A., et al. (1997). *Ob'ekt "Ukrytie". Istoriya, sostoyanie i perspektivy* [Shelter object. History, state and prospects]. Kyiv: Intergrafik, 224 p. (in Russ.)
4. Nosovskiy A. V. (2016). Naukovo-tekhniczni problemy peretvorennia obiekta "Ukryttia" na ekolohichno bezpechnu systemu [Scientific and technical problems of the Shelter object transformation into an ecologically safe system]. Proceedings of the *Parliamentary hearings in the Verkhovna Rada of Ukraine "30 years after Chornobyl: lessons and prospects" (March 16, 2016)*. Kyiv: Parliamentary Publishing House, pp. 50—51. (in Ukr.)
5. Krasnov V. O., Nosovskiy A. V., Rudko V. M., Shcherbin V. M. (2016). *Obiekt "Ukrytia": 30 rokiv pislia avarii* [Shelter object: 30 years after the accident]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 512 p. (in Ukr.)
6. Kliuchnikov O. O., Nosovskiy A. V. (2004). Naukovo-tekhniczni aspekty peretvorennia obiekta "Ukryttia" na ekolohichno bezpechnu systemu [Scientific and technical aspects of the Shelter object transformation into an ecologically safe system]. *Scientific news of NTUU KPI* [Scientific news of NTUU KPI], vol. 36, no. 4, pp. 47—56. (in Ukr.)
7. Aleshin A. M., Geras'ko V. N., Nosovskiy A. V. (2000). Strategiya realizatsii plana osushchestvleniya pervoocherednykh meropriyatiy na ob'ekte "Ukrytie" [Strategy for the implementation of the plan of priority measures at the Shelter object]. *Ekologiya i atomnaya energetika* [Ecology and nuclear power], vol. 2, pp. 77—82. (in Russ.)
8. Nosovskiy A. V. (2017). Pro stan ta perspektyvy naukovo-tekhnicznego suprovodu z peretvorennia obiekta "Ukryttia" na ekolohichno bezpechnu systemu [On the state and prospects of scientific and technical support for the transformation of the Shelter object into an ecologically safe system]. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine], vol. 4, no. 13—21. (in Ukr.)
9. Baryakhtar V. G., Klyuchnikov A. A., Nosovskiy A. V. (2003). O neobkhodimosti reformirovaniya nauki v Ukraine i stozdaniya nauchno-issledovatel'skogo instituta atomnoi energetiki [On

---

---

the need to reform a science in Ukraine and create a research institute for nuclear power]. *Problemy Chornobylia* [Problems of Chornobyl], vol. 12, pp. 6—16. (in Russ.)

10. Nosovskyi A. V. (2004). O nauchno-tekhnicheskom soprovozhenii atomnoi energetiki [On scientific and technical support of nuclear energy]. *Energeticheskaya politika Ukrainy* [Energy policy of Ukraine], vol. 4, pp. 90—94. (in Russ.)

11. Law of Ukraine “On general principles of Chornobyl NPP further operation and decommissioning and transformation of the damaged fourth power unit of this NPP into an ecologically safe system” no. 309-XIV dated 11.12.1998. *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy* [Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine], no. 4, art. 33. (in Ukr.)

12. SIP-P-PM-21-330-EXN-004-01, rev. 2. *Strategiia dalneishei realizatsii proekta NBK* [Strategy for further implementation of the NSC project], 27 p. (in Russ.)

13. Panasyuk N. I., Alferov A. M., Podbereznyi S. S., Levin G. V., Litvin I. A. (2009). Otsenka parametrov radioaktivnogo zagryazneniya gruntov v raione ob'ekta “Ukrytie” [Assessment of parameters of radioactive contamination of soils in the area of the Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylia* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 11, pp. 115—119. (in Russ.)

14. SIP-N-LI-22-A500-CDS-001-01, rev. 1. *Dokument po bezopasnosti v ramkakh kontseptsii proekta PK-1 NBK* [NSC CS-1 Conceptual Design Safety Document]. 2008, 257 p. (in Russ.)

15. Gorodetsky D. V., Derengovsky V. V., Egorov V. V., Pavlovsky L. I., Kholodiuk A. A. (2015). Radiatsionnaya obstanovka v zonakh proizvodstva rabot po stroitel'stvu vostochnoi i zapadnoi sten ogradhayushchego kontura novogo bezopasnogo konfainmenta i prognoz ee izmeneniya v khode vypolneniya rabot [The radiation situation in the zones of the construction of the eastern and western walls of the enclosing perimeter of the New safe confinement and the forecast of its change in the course of the work]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylia* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 24, pp. 118—126. (in Russ.)

16. *State Specialized Enterprise “Chornobyl NPP”*: official website. Available at: <http://chnpp.gov.ua>.

17. Pazukhin E. M. (1999). *Lavoobraznye toplivosoderzhashchie massy 4-go bloka Chernobyl'skoi AES: topografiya, fiziko-khimicheskie svoistva, stsennarii obrazovaniya, vliyanie na okruzhayushchuyu sredu* [Lava-like fuel-containing masses of the 4th unit of the Chornobyl NPP: topography, physico-chemical properties, scenario of formation, impact on the environment] (Dr. tech. sci. diss.). Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 293 p. (in Russ.)

18. Gonchar V. V., Zhidkov A. V. (2002). Dinamika vysokotemperaturnogo vzaimodeistviya avariinogo yadernogo topliva s konstruktivnymi materialami RBMK [Dynamics of high-temperature interaction of emergency nuclear fuel with RBMK structural materials]. *Problemy Chornobylia* [Problems of Chornobyl], vol. 9, pp. 25—33. (in Russ.)

19. Zhidkov O. V. (2007). *Elektronni protsesy v oprominenykh dielektrykakh ta vlastyosti kompozitsii, shcho mistiat yaderne palyvo* [Electronic processes in irradiated dielectrics and properties of compositions containing nuclear fuel] (Dr. phys. and math. sci. diss.). Lviv: Institute of Condensed Matter Physics, NAS of Ukraine, 443 p. (in Ukr.)

- 
- 
20. Lagunenکو A. S. (2009). *Izuchenie skrytykh skoplenii toplivosoderzhashchikh materialov razrushennogo 4-go bloka Chernobyl'skoi AES* [Study of hidden accumulations of fuel-containing materials of the destroyed 4th unit of the Chornobyl nuclear power plant] (PhD tech. sci. diss.). Kyiv: ISP NPP, NAS of Ukraine, 148 p. (in Russ.)
21. Arutyunyan R. E., Bolshov L. A., Borovoi A. A., Velikhov Ye. P., Klyuchnikov A. A. (2010). *Yadernoye toplivo v obyekte "Ukrytie"* [Nuclear fuel in the Shelter object]. Moscow: Nauka, 240 p. (in Russ.)
22. Zhidkov O. V. (2011). 25 rokov evoliutsii uiaaven pro palyvovmisni materialy obiekta "Ukritia": Stsenarii utvorenniay ikh ta fizychni mirkuvannia [25 years of evolution of ideas about fuel-containing materials of the Shelter object: Scenarios of their formation and physical considerations]. *Problemy Chornobylia* [Problems of Chornobyl], vol. 16, pp. 86—100.
23. Vysotskii E. D., Mikhailov A. V. (2013). Kontseptual'naya model' "domennoi" versti obrazovaniya yaderno opasnykh skoplenii na 4-m bloke ChAES [Conceptual model of the "domain" vertex of the formation of nuclear hazardous accumulations at the 4th unit of the Chornobyl NPP]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylia* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 21, pp. 99—106. (in Russ.)
24. Lagunenکو A. S., Krasnov V. A., Dovydkov S. A. (2015). Toplivo v pomeshchenii 305/2. Vozmozhnyi stsenarii obrazovaniya yaderno opasnykh zon [Fuel in room 305/2. Possible scenarios of the formation of nuclear hazardous zones]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylia* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 24, pp. 51—61. (in Russ.)
25. *Spravka o kolichestve yadernogo topliva na energobloke № 4 Chernobyl'skoi AES v moment avarii. Utverzhdena glavnym inzhenerom PO ChAES 30.01.96 g.* [Information on the amount of nuclear fuel at power unit no. 4 of the Chornobyl NPP at the moment of the accident. Approved by the chief engineer of the ChNPP on January 30, 1996.]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 1 p. (in Russ.)
26. *Issledovanie vliyaniya izmenenii svoistv toplivosoderzhashchikh materialov ob'ekta "Ukrytie" na ego yadernuyu, radiatsionnuyu i radioekologicheskuyu bezopasnost'. Tom 1: "Analiz protsessov obrazovaniya i povedeniya lavoobraznykh toplivosoderzhashchikh materialov pri avarii na ChAES"* [Investigation of the influence of changes in the properties of fuel-containing materials of the Shelter object on its nuclear, radiation and radioecological safety. Volume 1: "Analysis of the processes of formation and behavior of lava-like fuel-containing materials during the Chornobyl accident"]. Research report. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 2011, 124 p. (in Russ.)
27. *Analiz tekushchei bezopasnosti ob'ekta "Ukrytie" i prognoзные otsenki razvitiya situatsii* [Analysis of the current safety of the Shelter object and predictive assessments of the development of the situation]. Research report. Chornobyl: ISTC Shelter, 2001, 337 p. (in Russ.)
28. Pazukhin E. M. (1994). Lavoobraznyye toplivosoderzhashchiye massy 4-go bloka Chernobyl'skoy AES: topografiya, fiziko-khimicheskiye svoystva, stsenarii obrazovaniya [Lava-like fuel-containing masses of the 4th unit of the Chornobyl nuclear power plant: topography, physicochemical properties, formation scenario]. *Radiokhimiya* [Radiochemistry], vol. 36, no. 2, pp. 97—142. (in Russ.)



---

29. Borovoy A. A., Lagunencko A. S., Pazukhin E. M. (2000). Novye otsenki kolichestva yadernogo topliva, nakhodyashchegosya na nizhnikh otmetkakh obekta "Ukrytie" [The new estimations of the nuclear fuel quantity allocated into the Shelter object low floor levels]. *Problemy Chornobylia* [Problems of Chornobyl], vol. 6, pp. 13—16. (in Russ.)

30. *Rozrobka naukovo-tekhnichnykh zasad ta obgruntuvannia pryntsypovykh tekhnolohichnykh rishen shchodo vyluchennia PVM iz obiekta "Ukryttia" z vykorystanniam maibutnoho bezpechnoho konfainmenta ta stvorennia vidpovidnoi infrastruktury dlia podalshoho povodzhennia z nymy* [Development of scientific and technical principles and substantiation of basic technological solutions for the removal of fuel from the Shelter object using future safe confinement and the creation of appropriate infrastructure for their further treatment]. Research report. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 2014, 443 p. (in Ukr.)

31. Bogatov S. A., Borovoi A. A., Gavrillov S. A. (2007). *Baza dannykh po mestonakhozhdeniyu i sostoyaniyu yadernogo topliva 4-go energobloka ChAES do i posle avarii. Proekt № 2916 "Razrabotka modeli povedeniya yadernogo topliva vo vremya aktivnoi stadii avarii"* [Database on the location and condition of nuclear fuel of the 4th power unit of the ChNPP before and after the accident. Project no. 2916 "Development of a Model of Nuclear Fuel Behavior During the Active Stage of an Accident"]. Moscow: RRC "Kurchatov Institute", 147 p. (in Russ.)

32. Kiselev A. N., Nenaglyadov A. Yu., Surin A. I., Checherov K. P. (1992). *Ekspymental'nye issledovaniya lavoobraznykh toplivosoderzhashchikh mass (TSM) na 4-m bloke ChAES* [Experimental studies of lava-like fuel-containing masses (FCM) at the 4th unit of the ChNPP]. Moscow: RRC "Kurchatov Institute", 120 p. (in Russ.)

33. Kiselev A. N., Surin A. I., Checherov K. P. (1994). *Rezultaty dopolnitel'nykh issledovaniy mest skoplenii LTSM na 4-m bloke ChAES* [Results of additional studies of LFCM accumulation sites at ChNPP Unit 4]. Moscow: RRC "Kurchatov Institute", 59 p. (in Russ.)

34. Belyaev S. T., Borovoy A. A., Volkov V. G. (1990). *Tekhnicheskoe obosnovanie yadernoi bezopasnosti obekta "Ukrytie"* [Technical substantiation of the nuclear safety of the Shelter object]. Research report. Chornobyl: Complex expedition of the RRC "Kurchatov Institute", 160 p. (in Russ.)

35. Institute of Physics and Power Engineering (1992). *Ekspertnoe zaklyuchenie na materialy po otsenke i prognozu sostoyaniya yadernoi i radiatsionnoi bezopasnosti obekta "Ukrytie"* [Expert opinion on materials for assessing and predicting the state of nuclear and radiation safety of the Shelter object], no. 60/12 dated 01.07.1992, 16 p. (in Russ.)

36. Institute of Nuclear Energy, AS of BSSR (1990). *Analiz yadernoi bezopasnosti obekta "Ukrytie"* [Analysis of the nuclear safety of the Shelter object]. Report. Minsk, 80 p.

37. Bogatov S. A., Borovoy A. A., Gavrillov S. A., et al. *Sostoyanie yadernoi, radiatsionnoi i ekologicheskoi bezopasnosti obekta "Ukrytie". (Sbor, verifikatsiya, predstavlenie informatsii, provedenie dopolnitel'nykh issledovaniy)* [The state of nuclear, radiation and environmental safety of the Shelter object. (Collection, verification, presentation of information, additional research)]. Report. Moscow: RRC "Kurchatov Institute", 120 p. (in Russ.)

38. Borovoy A. A. et al. (1996). *Analiz tekushchei bezopasnosti obekta "Ukrytie" i prognozyne otsenki razvitiya situatsii* [Analysis of the current safety of the Shelter object and predictive assessments of the development of the situation]. Report. Chornobyl: ISTC Shelter, 272 p. (in Russ.)

---

---

39. Borovoy A. A. et al. (2001). *Razrabotka metodik i sposobov kontrolya sostoyaniya podkritichnosti toplivosoderzhashchikh materialov, eksperimental'noe issledovanie effektivnosti kriteriev rannego obnaruzheniya i tekhnologii lokal'nogo podavleniya podkriticheskikh anomalii* [Development of methods and ways for monitoring the state of subcriticality of fuel-containing materials, experimental study of the effectiveness of early detection criteria and technology for local suppression of subcritical anomalies]. Report. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 129 p. (in Russ.)

40. *Skvazhiny ob'ekta "Ukrytie". Obobshchennye dannye (al'bom)* [Wells of the Shelter object. Summarized data (album)]. Report. Chornobyl: ISTC Shelter, 1998, 117 p. (in Russ.)

41. *Razrabotka meropriyatiy, povyshayushchikh yadernuyu, radiatsionnuyu i ekologicheskuyu bezopasnost' ob'ekta "Ukrytie" i novogo bezopasnogo konfainmenta. Tom 1: "Issledovanie neitronno-fizicheskikh i fiziko-khimicheskikh kharakteristik yaderno opasnykh skoplenii i razrabotka sposobov podavleniya ikh parametrov kritichnosti"* [Development of measures to increase the nuclear, radiation and environmental safety of the Shelter object and a New safe confinement. Volume 1. Investigation of the neutron-physical and physicochemical characteristics of nuclear hazardous clusters and the development of methods for suppressing their criticality parameters]. Final research report. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 2015, 127 p. (in Russ.)

42. Babenko V. A., Vysotsky E. D., Klyuchnikov A. A. (2008). Modelirovanie massovykh i geometricheskikh parametrov skopleniya toplivosoderzhashchikh materialov v yugo-vostochnoi chasti pomeshcheniya 305/2 razrushennogo 4-go bloka ChAES [Modeling of mass and geometric parameters of the accumulation of fuel-containing materials in the southeastern part of premise 305/2 of the destroyed 4th unit of the ChNPP]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 9, pp. 36—42. (in Russ.)

43. Vysotsky E. D., Klyuchnikov A. A., Lagunenکو A. S., Pazukhin E. M., Shcherbin V. N. (2011). Yaderno-opasnye skopleniya toplivosoderzhashchikh materialov v razrushennom chetvertom bloke Chernobyl'skoi AES [Nuclear-hazardous accumulations of fuel-containing materials in the destroyed fourth unit of the Chornobyl nuclear power plant]. *Radiokhimiya* [Radiochemistry], vol. 53, no. 2, pp. 178—183. (in Russ.)

44. Complex expedition of the RRC "Kurchatov Institute" (1989). *Rezultaty teplovykh i radiatsionnykh izmerenii na OU za period 1988—1989 gg.* [Results of thermal and radiation measurements at the SO for the period 1988—1989]. Report. Chornobyl: ISTC Shelter, 1998, 47 p. (in Russ.)

45. Borovoy A. A. (1990). *Post-Accident Management of Destroyed Fuel from Chernobyl*. Analytical Report. IAEA, Work Material, pp. 1—99.

46. Borovoy A. A., Lagunenکو A. S., Pazukhin E. M. (1998). Otsenka kolichestva topliva v podaparatnom pomeshchenii 305/2 4-go energobloka ChAES [Estimation of the amount of fuel in the equipment premise 305/2 of the 4th power unit of the ChNPP]. *Atomnaya energiya* [Atomic energy], vol. 84, no. 4, pp. 356—362. (in Russ.)

47. Borovoy A. et. all. (1998). *The Shelter Current Safety Analysis and Situation Development Forecasts* (update version). Tasis, European Commission, 103 p.

---

48. Arzumanov S. S., Belyaev S. T., Bondarenko L. N., et al. (1993). *Razvitie sistemy neitron-nogo kontrolya na 4-om energobloke ChAES* [Development of the neutron monitoring system at the 4th power unit of the ChNPP]. Moscow: I. V. Kurchatov Institute of Atomic Energy, 46 p. (in Russ.)

49. *Tekhnologicheskii reglament ob'ekta "Ukrytie" reaktora bloka № 4 Chernobyl'skoi AES (1R-OU)* [Technological regulations of the Shelter object of the reactor of Unit 4 of the Chornobyl NPP (1R-OU)], 71 p. (in Russ.)

50. Complex expedition of the RRC "Kurchatov Institute" (1990). *Otsenka kolichestva topliva v skopleniyakh TSM v podapparatnom pomeshchenii* [Estimation of the amount of fuel in the FCM clusters in the equipment room]. Research report. Chornobyl, 11 p. (in Russ.)

51. PBYa-06-00-88. *Osnovnye pravila yadernoi bezopasnosti pri pererabotke, khranении i transportirovani yadernо opasnykh delyashchikhsya materialov* [Basic rules of nuclear safety in the processing, storage and transportation of nuclear hazardous fissile materials]. Moscow, 1988, 35 p. (in Russ.)

52. *Razrabotka sredstv, povyshayushchikh radiatsionnuyu i ekologicheskuyu bezopasnost' novogo bezopasnogo konfainmenta i obekta "Ukrytie"* [Development of means to improve the radiation and environmental safety of the New safe confinement and the Shelter object]. Research report. Volume 2. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 2015, 190 p. (in Russ.)

53. Odintsov A. A., Khan V. E., Krasnov V. A., Shcherbin V. N. (2008). Ob'emnaya aktivnost' transuranovykh elementov v zhidkikh radioaktivnykh otkhodakh ob'ekta "Ukrytie", vliyayushchikh na yadernuyu i radiatsionnuyu bezopasnost' [Volume activity of transuranium elements in liquid radioactive waste of the Shelter object, affecting nuclear and radiation safety]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 9, pp. 80—93. (in Russ.)

54. Zhidkov A. V. (2001). Toplivosoderzhashchie materialy obekta "Ukrytie" segodnya: aktualnye fizicheskie svoystva i vozmozhnosti prognozirovaniya ikh sostoyaniya [The Shelter object fuel-containing materials today: Actual physical properties and the ability to predict their state]. *Problemy Chornobyliya* [Problems of Chornobyl], vol. 7, pp. 23—40. (in Russ.)

55. Danilevich A. G., Chemerskii G. F. (2004). Okislenie obluchennogo topliva RBMK v vozdushnoi srede [Oxidation of irradiated RBMK fuel in the air]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 1, pp. 136—142. (in Russ.)

56. *Dovgostrokovi prognoz povedinky palyvnogo pyly v obiekte "Ukryttia"* [Long-term forecast of fuel dust behavior in the Shelter object]. Project 4207, final technical report. Chornobyl: STCU, 2011, 177 p.

57. Issledovanie fiziko-khimicheskikh svoistv toplivosoderzhashchikh materialov ob'ekta "Ukrytie" (za materialami zvitiv pro robotu, vikonani v MNTTs "Ukrittia" v 1997 r. [Research of physiochemical properties of fuel-containing materials of the Shelter object (according to the reports on the work performed at the ISTC "Shelter" in 1997] *Problemy Chornobyliya* [Problems of Chornobyl], vol. 3, pp. 33—35. (in Russ.)

58. Baryakhtar V. G., Gonchar V. V., Zhidkov A. V., Klyuchnikov A. A. (1997). *O pyllegeneriruyushchei sposobnosti avariinogo obluchennogo topliva i lavoobraznykh toplivosoderzhashchikh materialov*

---

---

ob'ekta "Ukrytie" [On the dust-generating capacity of the emergency irradiated fuel and lava-like fuel-containing materials of the Shelter object]. Chornobyl: ISTC Shelter, 20 p. (in Russ.)

59. Shiryaev A. A., Vlasova I. E., Ogorodnikov B. I., Grigor'ev M. S. (2015). Izuchenie dispergirovannykh chastits lavoobraznykh toplivosoderzhashchikh materialov Chernobyl'skoi AES [Study of dispersed particles of lava-like fuel-containing materials of the Chornobyl NPP]. Proceedings of the Tenth Petryanov and First Fuchsian readings (Moscow, April 21—23, 2015). Moscow: Karpov Institute of Physical Chemistry, pp. 158—160. (in Russ.)

60. SIP-EBPD-D-0108. Otchet po kharakterizatsii toplivosoderzhashchikh materialov Fazy 1 [Phase 1 Fuel-Containing Material Characterization Report]. SSE "ChNPP", 2000, 191 p. (in Russ.)

61. Gabielkov S. V., Zhyhaniuk I. V., Kudlai V. H., Nosovskiy A. V., Parkhomchuk P. Ye., Chykolovets S. O., Shcherbin V. M. (2019). Fazovyi sklad korychnoevoi keramiky lavopodibnykh palyvovmisnykh materialiv ob'ekta "Ukrytia" Chornobyl'skoi AES [Phase composition of brown ceramics of lava-like fuel-containing materials of the Shelter object of the Chornobyl NPP]. *Yaderna fizyka ta enerhetyka* [Nuclear physics and energy], vol. 20, pp. 388—396. (in Ukr.)

62. Skorbun A. D., Gabielkov S. V., Zhyhaniuk I. V., Kudlai V. G., Parkhomchuk P. E., Chykolovets S. A. (2019). Method of X-Ray diffraction data processing for multiphase materials with low phase contents. *Ukrainian Journal of Physics*, vol. 64, no. 9, pp. 870—878. doi: 10.15407/ujpe64.9.870.

63. Gabielkov S. V., Kliuchnykov O. O., Oliynyk Ye. Ye., Parkhomchuk P. E., Chemersky G. F., Shcherbin V. N. (2014). Nanorazmernye porovye kanaly kak sostavlyayushchaya porovogo prostranstva lavoobraznykh toplivosoderzhashchikh materialov ob'ekta "Ukrytie" [Nanosized pore channels as a component of pore space of lava-like fuel-containing materials of the Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylia* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 22, pp. 70—75. (in Russ.)

64. Gabielkov S. V., Klyuchnikov A. A., Parkhomchuk P. E., Chemersky G. F. (2015). Priroda formirovaniya nanorazmernykh porovykh kanalov lavoobraznykh toplivosoderzhashchikh materialov ob'ekta "Ukrytie" [Nature of formation of nanosized pore channels of lava-like fuel-containing materials of Shelter object]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki* [Problems of atomic science and technology], vol. 96, no. 2, pp. 77—83. (in Russ.)

65. Gabielkov S. V., Nosovskiy A. V., Shcherbin V. N. (2016). Model' degradatsii lavoobraznykh toplivosoderzhashchikh materialov ob'ekta "Ukrytie" [Degradation model for microstructure of lava-like fuel-containing materials of Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylia* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 26, pp. 75—84. (in Russ.)

66. Decision of the joint meeting of the STC section of the USSR Gospromatomnadzor and the Gosatomnadzor Commission "About scientific and technical safety problems of the Shelter object", no. 12-91-NTS dated 16.05.1991. (in Russ.)

67. Godun R. L., Doroshenko A. O., Muliar D. O. (2020). Otsenka effektivnosti reglamentnoi sistemy kontrolya yadernoi bezopasnosti kompleksa NBK-OU [The efficiency assessment of the state system of nuclear safety control of NSC-SO]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki* [Problems of Atomic Science and Technology], vol. 126, no. 2, pp. 71—80. (in Russ.)

---

68. *Nauchno-tehnicheskoe soprovozhdenie na etapakh vvedeniya v ekspluatatsiyu i ekspluatatsii NBK-OU (aspekty yadernoi i radiatsionnoi bezopasnosti)* [Scientific and technical support at the stages of commissioning and operation of the NSC-SO (aspects of nuclear and radiation safety)]. Research report. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 2018, 124 p. (in Russ.)

69. *Expert opinion of SSTC NRS no. 08-10-4515 on the “Report on the safety status of the Shelter object”*. Kyiv: State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine, 2008, 10 p. (in Russ.)

70. *Obespechenie yadernoi bezopasnosti ob'ekta “Ukrytie”* [Ensuring nuclear safety of the Shelter object]. ChNPP report. Slavutych, 2009, 50 p. (in Russ.)

71. *Report on the security status of the Shelter object for 2018*. ChNPP report. Slavutych, 2019, 53 p. (in Russ.)

72. *Report on the security status of the Shelter object for 2017*. ChNPP report. Slavutych, 2018, 56 p. (in Russ.)

73. *Report on the security status of the Shelter object for 2016*. ChNPP report. Slavutych, 2017, 58 p. (in Russ.)

74. *Kontrol' neorganizovannykh vybrosov iz OU* [Control of fugitive emissions from SO]. Final report, contract 177/05. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 2005, 86 p. (in Russ.)

75. Vysotskiy E. D., Godun R. L. (2015). Neitronnaya aktivnost' skoplenii lavoobraznykh toplivosoderzhashchikh materialov na 4-om bloke ChAES [Neutron activity of accumulations of lava-like fuel-containing materials at the 4th unit of the ChNPP]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 25, pp. 108—115. (in Russ.)

76. Odintsov A. A., Khan V. E., Krasnov V. A., Shcherbin V. N., Yakovenko M. N. (2014). Radioaktivno zagryaznennaya voda v pomeshcheniyakh ob'ekta “Ukrytie” [Radioactively contaminated water in the premises of the Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 23, pp. 89—101. (in Russ.)

77. Vysotskiy E. D., Krasnov V. A., Klyuchnikov A. A. (2006). Effektivnost' neitronnogo kontrolya i yadernaya bezopasnost' ob'ekta “Ukrytie” [Efficiency of neutron control and nuclear safety of the Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 5, pp. 138—150. (in Russ.)

78. *Nauchno-tehnicheskoe soprovozhdenie na etapakh vvedeniya v ekspluatatsiyu i ekspluatatsii NBK-OU (aspekty yadernoi i radiatsionnoi bezopasnosti)* [Scientific and technical support at the stages of commissioning and operation of the NSC-SO (aspects of nuclear and radiation safety)]. Final research report, contract no. 377/18. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 2018, 175 p. (in Russ.)

79. Vysotskiy Ye. D., Sushchenko K. O., Godun R. L. (2020). Ekspertnaya otsenka tekushchego urovnya podkritichnosti skoplenii toplivosoderzhashchikh materialov v ob'ekte “Ukrytie” posle ustanovki novogo bezopasnogo konfainmenta [Expert assessment of the current criticality level of clusters of fuel-containing materials after the New safe confinement installing]. *Yaderna energetyka ta dovkillia* [Nuclear power and the environment], vol. 16, no. 1, pp. 49—55. doi: 10.31717/2311-8253.20.1.6. (in Russ.)



- 
- 
80. Yehorov V. V., Morozov Yu. V., Pavlovskiy L. I., Kholodiuk A. O. (2017). Zmina radiatsiynykh umov na ob'ekti "Ukryttia" pislia vstanovlennia arochnoi konstrukttsii u proektne polozhennia [Change of radiation conditions at the Shelter object after installation of an arched structure in the design position]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylia* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 28, pp. 75—81. (in Ukr.)
81. Batii V. H., Yehorov V. V., Zakrevskiy Yu. A., Kliuchnykov O. O., Kochniev M. O., Kuzmenko V. O., Rudko V. M., Sizov A. O., Shcherbin V. M. (2004). *Prystrii dlia vymiriuuvannia kutovoho rozpodilu intensyvnosti hamma-vyprominiuvannia* [Device for measuring the angular distribution of gamma radiation intensity]. Patent UA, no. 51987, MIIK7 G01T 1/28. (in Ukr.)
82. SSE "ChNPP" (2016). *Prohrama naukovo-tekhnichnoho suprovodu na etapakh vvedennia v ekspluatatsiiu ta ekspluatatsii NBK-OU* [Program of scientific and technical support at the stages of commissioning and operation of the NSC-SO], 28 p. (in Ukr.)
83. Novikov A., Sharshun S., Yakovenko L., Stromko E., Evstigneev A. (2019). Izmerenie MED v blizhnei zone NBK dlya otsenki effektivnosti protivoradiatsionnoi zashchity [EDR measurement in the near field of NSC to assess efficiency of radiation protection]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylia* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 32, pp. 67—73. (in Russ.)
84. SIP K 01 21 310 MR1 003 01. Task 1: *Measurements of overhead gamma radiation fields*. Phase 1. Measurement Report. Consortium KSK, 2003, 102 p. (in Russ.)
85. SIP K 01 21 310 MR2 003 02. Task 1: *Measurements of overhead gamma radiation fields*. Phase 2. Measurement Report. Consortium KSK, 2004, 211 p. (in Russ.)
86. SIP-N-LI-22-E002-SCR-002-01/LCO-NKA-NSC-017-1-RU. License package 6 (LP-6). Project "Protective structure with technological life support systems and the necessary infrastructure": Report on compliance with the requirements of sanitary legislation. Slavutych, 2012, 277 p. (in Russ.)
87. Ogorodnikov B. I., Pazukhin E. M., Klyuchnikov A. A. (2008). *Radioaktivnye aerosoli ob'ekta "Ukrytie": 1986—2006 gg.* [Radioactive aerosols of the Shelter object: 1986—2006]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 456 p. (in Russ.)
88. SIP-03/1/C01. Task 10. *Dusthandling. Dustdescription plan*. Document no. TN/00101. ChNPP, 1999, 83 p. (in Russ.)
89. *Poluchenie eksperimental'nykh dannykh dlya opredeleniya sovremennogo sostoyaniya pylevogo zagryazneniya i provedenie kolichestvennykh otsenok posledstviu radiatsionnoi avarii na ob'ekte "Ukrytie"* [Obtaining experimental data to determine the current state of dust pollution and quantitative assessments of the consequences of a radiation accident at the Shelter object. Report on the second stage of the contract 78/96]. Chornobyl, 1997, 36 p. (in Russ.)
90. Bogatov S. A., Borovoy A. A. (2000). *Otsenka zapasov i opredelenie svoistv pylevogo zagryazneniya v podkrovel'nom prostranstve ob'ekta "Ukrytie"* [Assessment of reserves and determination of the properties of dust pollution in the under-roof space of the Shelter object]. Chornobyl: ISTC Shelter, 16 p. (in Russ.)
91. SIP-P-PM-22-460-SAR-124-05. *Shelter object security status report*. 5 edition. SSE "ChNPP", 2008, 436 p. (in Russ.)
- 
-

- 
92. Kashparov V. A., Ivanov Yu. A., Zvarich S. I., Protsak V. P., Khomutinin Yu. V., Kurepin A. D., Pazukhin E. M. (1996). Formation of Hot Particles During the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident. *Nuclear Technology*, vol. 114, no. 1, pp. 246—253. doi: 10.13182/NT96-A35253.
93. Kashparov V. A., Protsak V. P., Ahamdach N., Stammose D., Peres J. M., Yoschenko V. I., Zvarich S. I. (2000). Dissolution kinetics of particles of irradiated Chernobyl nuclear fuel: influence of pH and oxidation state on the release of radionuclides in contaminated soil of Chernobyl. *Journal of Nuclear Materials*, vol. 279, pp. 225—233.
94. Kashparov V. A., Oughton D. H., Zvarich S. I., Protsak V. P., Levchuk S. E. (1999). Kinetics of fuel particle weathering and  $^{90}\text{Sr}$  mobility in the Chernobyl 30-km exclusion zone. *Health Physics*, vol. 76, no. 3, pp. 251—259.
95. Klyuchnikov A. A., Rybalka V. B., Petelin G. I., et al. (2015). Morfologiya chastits yadernogo topliva chernobyl'skogo vybroso [The morphology of nuclear fuel particles from the Chornobyl release]. *Pershii nezalezhnii naukovii visnik* [The first independent scientific journal], vol. 4—1, pp. 82—88. (in Russ.)
96. Frost B. (1986). *Tvely yadernykh reaktorov* [Fuel elements of nuclear reactors]. Moscow: Energoatomizdat, 240 p. (in Russ.)
97. Tepikin V. E., Rybalka S. I. (1993). “Goryachie” chastitsy uran-tsirkonievogo sostava Chernobyl'skoi avarii [“Hot” particles of uranium-zirconium composition of the Chornobyl accident]. Chornobyl: Research and production association “Prypiat”, 19 p. (in Russ.)
98. *Kontrol' neorganizovannykh vybrosov iz ob'ekta “Ukrytie” i aerosol'noi obstanovki vo vremya stroitel'stva NBK* [Control of fugitive emissions from the Shelter object and aerosol environment during the construction of the NSC]. Report. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 2016, 199 p. (in Russ.)
99. Lagunencko A. S., Khan V. E., Kalinovskiy A. K., Krasnov V. A., Kashpur V. O., Dovydkov S. A. (2017). [Monitoring of releases of radioactive aerosols from Shelter object in 2015–2016]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobyliia* [Problems of nuclear power plants' safety and of Chornobyl], vol. 29, pp. 69—77. (in Russ.)
100. *Kompleksna otsinka sukupnykh vplyviv na navkolyshnie seredovyshche radiatsiino nebezpechnykh ob'ektiv chornobyl'skoi zony vidchuzhennia* [Comprehensive assessment of cumulative environmental impacts of radiation-hazardous objects of the Chornobyl exclusion zone]. Research report, part 2. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 2020, 888 p. (in Ukr.)
101. Lagunencko A. S., Khan V. E., Kalinovskiy A. K., Krasnov V. A., Kashpur V. O., Kovalchuk V. P. (2018). [Monitoring of radioactive aerosol releases from the Shelter object under conditions of New safe confinement in 2017]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobyliia* [Problems of nuclear power plants' safety and of Chornobyl], vol. 31, pp. 68—75. (in Russ.)
102. Lagunencko O. S., Khan V. Ye., Kalynovskiy O. K., Kashpur V. O., Kovalchuk V. P., Sabenin P. V., Svirid O. A., Tkach A. V., Yurchuk S. V. (2020). Radioaktyvni aerosoli v umovakh novoho bezpechnoho konfainmenta u 2018 r. [Radioactive aerosols in the conditions of a New safe confinement in 2018]. *Yaderna energetyka ta dovkillia* [Nuclear power and the environment], vol. 18, no. 3, pp. 79—85. (in Ukr.)
-

---

103. Issledovanie vliyaniya izmenenii svoystv toplivosoderzhashchikh materialov ob'ekta "Ukrytie" na ego yadernuyu, radiatsionnuyu i radioekologicheskuyu bezopasnost'. Tom 2: "Izuchenie povedeniya toplivosoderzhashchikh materialov ob'ekta "Ukrytie" kak faktora yadernoi, radiatsionnoi i radioekologicheskoi opasnosti pod vozdeistviem vneshnikh i vnutrennikh faktorov" [Investigation of the influence of changes in the properties of fuel-containing materials of the Shelter object on its nuclear, radiation and radioecological safety. Volume 2: "Study of the behavior of fuel-containing materials of the Shelter object as a factor of nuclear, radiation and radioecological hazard under the influence of external and internal factors"]. Research report. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 2011, 216 p. (in Russ.)

104. Ogorodnikov B. I., Khan V. Ye., Kovalchuk V. P. (2013). Aerizoli — svideteli razrusheniya lavoobraznykh toplivosoderzhashchikh materialov v obyekte "Ukrytie" [Aerosols as evidences of destruction in the Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobyliya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], vol. 20, pp. 94—106. (in Russ.)

105. Ogorodnikov B. I., Khan V. Ye., Kovalchuk V. P. (2015). Kharakteristiki radioaktivnykh aerizoley bliz skopleniya LTSM v pomeshchenii 012/15 ob'ekta "Ukrytie" [Characteristics of radioactive aerosols in 2014 near lava-like fuel containing materials in premise 012/15 of the Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobyliya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], vol. 25, pp. 125—138. (in Russ.)

106. Ogorodnikov B. I., Khan V. Ye., Kovalchuk V. P., Lagunenkov A. S., Dovydkov S. A. (2015). Sostav i kontsentratsii radioaktivnykh aerizoley v 2013 g. okolo skopleniya LTSM v pomeshchenii 210/7 ob'ekta "Ukrytie" [Composition and concentration of radioactive aerosols near lava-like fuel containing materials in premise 210/7 of the Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobyliya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], vol. 24, pp. 70—84. (in Russ.)

107. Lagunenkov A. S., Khan V. Ye., Odintsov O. O., Kovalchuk V. P., Kravchuk T. A., Kalinovskiy A. K., Kashpur V. O., Svirid O. A., Tkach A. V., Yurchuk S. V. (2019). Radioaktivnye aerizoli okolo skopleniya lavoobraznykh toplivosoderzhashchikh materialov v pomeshchenii 012/7 ob'ekta "Ukrytie" v 2017-2018 gg. [Radioactive aerosols in 2017-2018 near lava-like fuelcontaining materials in premise 012/7 of the Shelter object]. *Yaderna energetyka ta dovkillia* [Nuclear power and the environment], vol. 13, no. 1, pp. 83—90. doi: 10.31717/2311-8253.19.1.10. (in Russ.)

108. Lagunenkov A. S., Khan V. Ye., Odintsov O. O., Kalinovskiy O. K., Kovalchuk V. P., Kravchuk T. A., Filippov O. V., Popov M. M. (2019). Radioaktivnye aerizoli okolo skopleniya lavoobraznykh toplivosoderzhashchikh materialov v pomeshchenii 012/15 ob'ekta Ukrytie" v 2017-2018 gg. [Radioactive aerosols near lava-like fuelcontaining materials in premise 012/15 of the Shelter object in 2017-2018]. *Yaderna energetyka ta dovkillia* [Nuclear power and the environment], vol. 14, no. 2, pp. 31—38. doi:10.31717/2311-8253.19.2.5. (in Russ.)

109. Lagunenkov A. S., Khan V. Ye., Kalinovskiy A. K., Kashpur V. O., Kovalchuk V. P., Sabenin P. V., Svirid O. A., Tkach A. V., Yurchuk S. V. (2020). Radioaktivnye aerizoli okolo skopleniya lavoobraznykh toplivosoderzhashchikh materialov v pomeshchenii 012/7 ob'ekta "Ukrytie" Chernobyl'skoi AES v 2017-2018 gg. [Radioactive aerosols in 2017-2018 near lava-like fuelcontaining materials in premise 012/7 of the Shelter object of Chornobyl NPP]. *Yaderna energetyka ta dovkillia* [Nuclear power and the environment], vol. 17, no. 2, pp. 58—67. 10.31717/2311-8253.20.2.7 (in Russ.)

- 
110. Gabelkov S. V., Zhyhaniuk Y. V., Kudlai V. H., Parkhomchuk P. E., Skorbun A. D., Chykolovets S. A. (2019). Radiatsionno stimulirovannoe fazoobrazovanie v lavoobraznykh toplivovosoderzhashchikh materialakh 4-go bloka ChAES [Radiation-stimulated phase formation in lava-like fuel-containing materials from 4th unit of Chornobyl NPP]. Proceedings of the *Annual Scientific Conference of Institute for Nuclear Research (Kyiv, April 8–12, 2019)*. Available at: [http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2019/r\\_gabelkov.html](http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2019/r_gabelkov.html). (in Russ.)
111. Borovoy A. A., Krasnov V. A. (2001). Itogi raboty poslednikh let [Results of the work of recent years]. *Problemy Chornobylya* [Problems of Chornobyl], vol. 7, pp. 51–64. (in Russ.)
112. Uvelichivayushchayasya opasnost' ob'ekta "Ukrytie" [The increasing risk of the Shelter object]. IBRAE: official website. Available at: <http://www.ibrae.ac.ru/contents/202/>. (in Russ.)
113. Starostin A. *Chornobyl part 9.1. "Working in the conditions of cardinal changes"*. Available at: [https://pikabu.ru/story/chernobyl\\_ch91\\_rabota\\_v\\_usloviyakh\\_kardinalnykh\\_izmeneniy\\_7370149](https://pikabu.ru/story/chernobyl_ch91_rabota_v_usloviyakh_kardinalnykh_izmeneniy_7370149). (in Russ.)
114. Odintsov A. A., Khan V. E., Krasnov V. A., Pazukhin E. M., Shcherbin V. N. (2009). Transuranovye elementy v zhidkikh radioaktivnykh otkhodakh ob'ekta "Ukrytie" [Transuranic elements in liquid radioactive waste of the Shelter object]. *Radiokhimiya* [Radiochemistry], vol. 51, no. 4, pp. 337–343. (in Russ.)
115. Odintsov A. A., Khan V. E., Kalinovskiy A. K. (2015). Soderzhanie  $^{129}\text{I}$  v radioaktivno zagryaznennoi vode ob'ekta "Ukrytie" [ $^{129}\text{I}$  in radioactively contaminated water of the Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobylya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], vol. 24, pp. 62–69. (in Russ.)
116. Odintsov A. A., Khan V. E., Krasnov V. A., Shcherbin V. N. (2016). Mnogoletnii monitoring neorganizovannykh skoplenii zhidkikh radioaktivnykh otkhodov ob'ekta "Ukrytie" [Long-term monitoring of unorganized accumulations of liquid radioactive waste at the Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobylya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], vol. 27, pp. 43–57. (in Russ.)
117. Odintsov A. A., Khan V. Ye. (2018). Radioaktivno zagryaznennaya voda v ob'ekte "Ukrytie" posle nadvizhki "Arki" novogo bezopasnogo konfaynmenta v proyektnoye polozheniye [Radioactive water in the Shelter object after installing the "Arch" of the New safe confinement into design position]. *Problemy bezpeky elektrostantsiy i Chornobylya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], vol. 30, pp. 67–77. (in Russ.)
118. Bogatov S. A., Korneev A. A., Krinitsyn A. P., Strikhar' O. L., Shcherbin V. N. (2000). Issledovaniya vodopotokov vnutri ob'ekta "Ukrytie" [Investigation of water flows inside the Shelter object]. *Radiokhimiya* [Radiochemistry], vol. 42, no. 3, pp. 276–280. (in Russ.)
119. Krinitsyn A. P., Strikhar' O. L., Shcherbin V. N. (2003). Problema obrashcheniya s zhidkimi radioaktivnymi otkhodami ob'ekta "Ukrytie" [The problem of liquid radioactive waste management at the Shelter object]. *Radiokhimiya* [Radiochemistry], vol. 45, no. 5, pp. 461–465. (in Russ.)
120. Nosovskyi A. V., Kononovich A. L., Oskolkov B. Ya. (1994). Otsenka radioaktivnogo sostoyaniya podzemnykh vod v raione Chernobyl'skoi AES [Assessment of the radioactive state of groundwater in the area of the Chornobyl nuclear power plant]. *Atomnaya energiya* [Atomic energy], vol. 77, no. 5, pp. 386–391. (in Russ.)
-

---

---

121. Nosovskiy A. V., Korneev A. A., Oskolkov B. Ya. (1997). Vliyanie ob'ekta "Ukrytie" na okruzhayushchuyu sredu [The impact of the Shelter object on the environment]. Proceedings of the 2nd Int. scientific-practical conf., dedicated to the 10th anniversary of the completion of the construction of the Shelter object. *Ogni Slavuticha*, pp. 59—67. (in Russ.)

122. Nosovskiy A. V., Ivanov E. A., Khamyranov L. P. (1994). Radioaktivnoe zagryaznenie okruzhayushchei sredy Am-241 vsledstvie avarii na Chernobyl'skoi AES [Radioactive contamination of the environment Am-241 due to the accident at the Chornobyl nuclear power plant]. *Atomnaya energiya* [Atomic energy], vol. 77, no. 2, pp. 140—145. (in Russ.)

123. Nosovskiy A. V., Korneev A. A., Oskolkov B. Ya. (1999). Problemy ekologii ob'ekta "Ukrytie" [Ecological problems of the Shelter object]. *Problemy Chornobylia* [Problems of Chornobyl], vol. 5, pp. 17—123. (in Russ.)

124. Nosovskiy A. V., Vasil'chenko V. N., Ivanov E. A., et al. (1993). Radiatsionnaya opasnost' lesnykh pozharov [Radiation hazard of forest fires]. Proceedings of the *Scientific conference "Problems of radiation epidemiology of medical consequences of the Chornobyl accident"*. Kyiv: Dnipro, pp. 323—325. (in Russ.)

125. Nosovskiy A. V., Dzhepo S. P., Skal'skii A. S., et al. (1997). Prognoznoe i epignoznoe modelirovanie izmenenii gidrodinamicheskikh uslovii promplohchadki ChAES [Predictive and epignous modeling of changes in the hydrodynamic conditions of the ChNPP industrial site]. *Problemy Chernobyl'skoi zony otchuzhdeniya* [The problems of the Chornobyl exclusion zone], vol. 7, pp. 56—77. (in Russ.)

126. Nosovskiy A. V., Buhai D. O., Dzhepo S. P., et al. (1998). Radiohidroheolohichniy monitoring ob'ekta "Ukryttia" v zviazku z vyvedenniam ChAES iz ekspluatatsii [Radiohydrogeological monitoring of the Shelter object in connection with the decommissioning of the Chornobyl NPP]. Proceedings of the *Int. conf of UkrNS "Ecology of nuclear cycle enterprises"*, S. V. Barbashev (ed.). Odesa, Astroprint, p. 40. (in Ukr.)

127. Nosovskiy A. V., Buhai D. O., Dzhepo S. P., et al. (1999). Deiaki rezultaty radiohidroheolohichnoho monitoringu ob'ekta "Ukryttia" [Some results of radiohydrogeological monitoring of the Shelter object]. *Bull. ecol. the state of the exclusion zone and the zone of unconditional (compulsory) resettlement*, no. 14, pp. 19—21. (in Ukr.)

128. SIP-P-PM-22-460-SAR-124-05. *Shelter Security Status Report*, 5 edition. SSE "ChNPP", 2008, 436 p. (in Russ.)

129. Borovoy A. A., Dovbenko A. A., Smolyankina M. V., Stroganov A. A. (1991). *Opredelenie yaderno-fizicheskikh kharakteristik topliva 4-go energobloka ChAES* [Determination of nuclear-physical characteristics of the fuel of the 4th power unit of the ChNPP]. Report. Moscow: IBRAE, 140 p. (in Russ.)

130. Begichev S. N., Borovoi A. A., Burlakov E. V., et al. (1990). *Topливо reaktora 4-go bloka ChAES. Kratkii spravochnik* [Reactor fuel of the 4th unit of the ChNPP. Quick reference]. Moscow: RRC "Kurchatov Institute", 21 p. (in Russ.)

131. Kashparov V. O., Lundin S. M., Zvarych S. I. (2002). Vykyd ta zabrudnennia terytorii radionuklidamy u skladi palyvnykh chastok [Emission and contamination of the territory with



---

radionuclides in the composition of fuel particles]. *Bull. ecol. the state of the exclusion zone and the zone of unconditional (compulsory) resettlement*, no. 2, pp. 22—32. (in Ukr.)

132. Kalinovskiy A. K., Odintsov A. A., Chikur L. B. (2016). Fraksionirovaniye radio-nuklidov v aerolyakh lokal'noi zony ob'ekta "Ukrytie" po rezul'tatam radiokhimicheskogo vydeleniya [Fractionation of radionuclides in aerosols of the local zone of the Shelter object according to the results of radiochemical release]. *Problemy bezpeky elektrostantsiy i Chornobyliya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], vol. 26, pp. 90—96. (in Russ.)

133. Kalinovskiy A. K., Ogorodnikov B. I., Krasnov V. A. (2011). Radioaktivnye aero-zoli v lokal'noi zone ob'ekta "Ukrytie" v 2009—2010 gg. [Radioactive aerosols in the local area of the Shelter object in 2009-2010]. *Problemy bezpeky elektrostantsiy i Chornobyliya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], vol. 17, pp. 106—111. (in Russ.)

134. Kalynovskyi O. K. (2017). *Udoskonalennia monitorynhu radioaktyvnykh aerolyiv u lokalnii zoni obiekta "Ukryttia" na etapi sporudzhennia novoho bezpechnoho konfainmentu "Arka"* [Improving the monitoring of radioactive aerosols in the local area of the Shelter object at the stage of construction of a New safe confinement "Arch"] (PhD thesis). Kyiv: ISP NPP, 24 p. (in Ukr.)

135. Panasiuk M. I., Matrosov D. T., Petrosenko Y. I., Levin G. V., Lyushnya P. A., Sizov M. O., Palamar L. A., Onyshchenko I. P. (2018). Rivni radioaktyvnogo zabrudnennia pidzemnykh vod prommaidanchyka Chornobyl'skoi AES ta zasoby obmezhenntia yoho rozpov-siudzhennia [Levels of radioactive pollution of lower waters of the Chornobyl nuclear power plant and means of limitation of its distribution]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliya* [Problems of nuclear power plants' safety and of Chornobyl], vol. 30, pp. 87—92. (in Ukr.)

136. Panasiuk M. I., Sosonna N. V., Kovalenko I. O., Liushnia P. A., Levin H. V., Palamar L. A., Chykur L. B., Onyshchenko I. P. (2019). Zmina radiohidroekolohichnykh umov pid vplyvom us-tanovlennia "Arky" nad obiekto "Ukryttia" Chornobyl'skoi AES [Change in radiohydroecological conditions under the impact of the installation of the "Arch" over the Shelter object of the Chor-nobyl NPP]. *Yaderna energetyka ta dovkillia* [Nuclear power and the environment], vol. 15, no. 3, pp. 82—89 (in Ukr.)

137. Panasiuk M. I., Lytvyn I. A. (2017). Zakonomirnosti rozpodilu uranu v pidzemnykh vodakh prommaidanchyka Chornobyl'skoi AES [Patterns of uranium distribution in the groundwater of the ChNPP site]. *Yaderna fizyka ta enerhetyka* [Nuclear Physics and Energy], vol. 18, no. 1, pp. 56—62. (in Ukr.)

138. Panasiuk M. I., Stoianov O. I., Liushnia P. A., Levin H. V., Palamar L. A., Onyshchenko I. P. (2019). Rezultaty radiohidroekolohichnoho monitorynhu v raioni kompleksu NBK-OU ta zasoby z-menshennia zabrudnennia pidzemnykh vod [Results of radiohydroecological monitoring in the area of the NSC-SO complex and means of reducing groundwater pollution]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliya* [Problems of nuclear power plants' safety and of Chornobyl], vol. 32, pp. 74—79. (in Ukr.)

---

139. *Kontseptualnoe tekhnicheskoe reshenie "O sisteme mer po monitoringu sostoyaniya i povedeniya TSM", redaktsiya № 3 s uchetom ukazaniy YeBRR (KNK 096279) i rekomendatsiy MKG (IAG-09/3)* [Conceptual technical solution "On the system of measures for monitoring the condition and behavior of the FCM", revision no. 3, taking into account the instructions of the EBRD (KNK 096279) and the recommendations of the ICG (IAG-09/3)]. Slavutych, 2009, 16 p. (in Russ.)

140. Nosovskiy A. V. (ed.) (2017). *Institut problem bezopasnosti atomnykh elektrostantsiy NAN Ukrainy: 25 let* [Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of the National Academy of Sciences of Ukraine: 25 years]. Kyiv: ISP NPP, NAS of Ukraine, 416 p. (in Russ.)

141. Law of Ukraine "On the national program of decommissioning of the Chornobyl NPP and transformation of the Shelter object into an ecologically safe system", no. 886-VI dated 15.01.2009. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/886-17#Text> (in Ukr.)

142. Stelmakh D. A., Svierchkov S. F., Shumylova L. Ye., Dylidin V. Yu. (2016). Analiz neobkhidnosti aktualizatsii stratehii peretvorennya obiekta "Ukryttia" [Analysis of the need to update the strategy of transformation of the Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobyliya* [Problems of nuclear power plants' safety and of Chornobyl], vol. 27, pp. 35—42. (in Ukr.)

143. Law of Ukraine "On radioactive waste management" no. 256/95-BP dated 30.06.1995. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/255/95-%D0%B2%D1%80#Text>. (in Ukr.)

144. NRB-97/D-2000. *Normy radiatsiinoi bezpeky Ukrainy (dopovnennia). Radiatsiinyi zakhyst vid dzherel potentsiinoho oprominennia* [Radiation safety standards of Ukraine (supplement). Radiation protection against potential radiation sources]; approved by the resolution of the Chief State Sanitary Doctor of Ukraine no. 116 dated 12.07.2000. Kyiv, 80 p. (in Ukr.)

145. Law of Ukraine "On the use of nuclear energy and radiation safety", no. 39/95-BP dated 08.02.1995. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80#Text>.

146. Agreement between Ukraine and the International Atomic Energy Agency on the application of guarantees in connection with the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons. Ratified by the Law of Ukraine no. 737/97 dated 17.12.1997. *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy* [Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine], 1998, vol. 16, p. 71. (in Ukr.)

147. Law of Ukraine "On ratification of the Additional Protocol to the Agreement between Ukraine and the International Atomic Energy Agency on the application of safeguards under the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons", no. 3092-IV dated 16.11.2005. *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy* [Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine], 2006, vol. 2-3, art. 45. (in Ukr.)

148. *Regulations on the state system of accounting and control of nuclear materials* no. 1525-96-p, approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine no. 1525 dated 18.12.1996 (as amended in accordance with the Resolutions of the Cabinet of Ministers of Ukraine no. 1006 dated 09.08.2001 and no. 257 dated 25.03.2009). Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1525-96-%D0%BF#Text>.

149. Kaftanatina O. A., Paskevych S. A. (2018). Problemy obliku yadernykh materialiv pry peretvorenni obiekta "Ukryttia" na ekolohichno bezpechnu systemu [Problems of accounting of nuclear materials in the process of the Shelter object transformation into an ecologically safe system]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobyliya* [Problems of nuclear power plants' safety and of Chornobyl], vol. 31, pp. 109—113. (in Ukr.)

---

150. Zahalni polozhennia bezpeky zniattia z ekspluatatsii yadernykh ustanovok [General safety provisions for decommissioning of nuclear installations]. Approved by the Order of the SNRCU no. 440 dated 28.10.2020, registered in the Ministry of Justice of Ukraine on December 30, 2020. for no. 1311/35594. *Ofitsiyni visnyk Ukrainy* [Official bulletin of Ukraine] dated 15.01.2021, no. 4, p. 676. (in Ukr.)

151. NP 306.2.141-2008. Pro zatverdzhennia zahalnykh polozhen shchodo bezpeky atomnykh stantsii [On approval of general provisions on safety of nuclear power plants]. Approved by the Order of the SNRCU no. 164 dated 19.11.2007. *Ofitsiyni visnyk Ukrainy* [Official bulletin of Ukraine] dated 15.02.2008, no. 9, p. 28. (in Ukr.)

152. NP 306.2.145-2008. Pravyla yadernoi bezpeky reaktornykh ustanovok atomnykh stantsii z reaktoramy z vodoiu pid tyskom Nuclear safety rules for reactor plants of nuclear power plants with pressurized water reactors. Approved by the Order of the SNRCU no. 74 dated 05.04.2008. *Ofitsiyni visnyk Ukrainy* [Official bulletin of Ukraine] dated 23.06.2008, no. 43, p. 138. (in Ukr.)

153. NP 306.2.105-2004. Osnovni polozhennia zabezpechennia bezpeky promizhnykh skhovyshch vidpratsovanoho yadernoho palyva sukhoho typu [Basic provisions for ensuring the safety of intermediate storage facilities for spent nuclear fuel]. Approved by the Order of the SNRCU no. 198 dated 29.12.2004. *Ofitsiyni visnyk Ukrainy* [Official bulletin of Ukraine] dated 04.02.2005, no. 3, p. 202. (in Ukr.)

154. NP 306.2.183-2012. Pro zatverdzhennia Zahalnykh polozhen bezpeky yadernoi pidkrytychnoi ustanovky [On the statement of the General provisions of safety of nuclear subcritical installation]. Approved by the Order of the SNRCU no. 56 dated 12.03.2012. *Ofitsiyni visnyk Ukrainy* [Official bulletin of Ukraine] dated 18.05.2012, no. 35, p. 35. (in Ukr.)

155. PBPRM-2020. *Pravyla bezpechnoho perevezennia radioaktyvnykh materialiv* [Rules for safe transportation of radioactive materials]. Approved by the Order of the SNRCU no. 436 dated 27.10.2020. Available at: [http://search.ligazakon.ua/l\\_doc2.nsf/link1/RE35596.html](http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE35596.html). (in Ukr.)

156. Pro zatverdzhennia Vymoh bezpeky pid chas povodzhennia z yadernym palyvom [On approval of safety requirements for the nuclear fuel treatment]. Approved by the Order of the SNRCU no. 269 dated 21.06.2019. *Ofitsiyni visnyk Ukrainy* [Official bulletin of Ukraine] dated 20.08.2019, no. 63, p. 241. (in Ukr.)

157. OSPU-2005. Osnovni sanitarni pravyla zabezpechennia radiatsiinoi bezpeky Ukrainy [Basic sanitary rules for ensuring radiation safety of Ukraine]. Approved by the Order of Health of Ukraine no. 54 of 02.02.2005. *Ofitsiyni visnyk Ukrainy* [Official bulletin of Ukraine] dated 24.06.2005, no. 23, p. 197. (in Ukr.)

158. Aleksieieva Z. M., Borozenets H. P., Nosovskyi A. V., Pavlenko A. O. (2006). Deiaki aktualni pytannia povodzhennia z radioaktyvnymy vidkhodamy na maidanchyku Chornobylskoi AES [Some topical issues of radioactive waste management at the Chornobyl NPP site]. *Yaderna ta radiatsiina bezpeka* [Nuclear and radiation safety], vol. 9, no. 1, pp. 70—78. (in Ukr.)

159. Nosovskyi A. V., Vasylenko V. M., Pavlenko A. O., et al. (2007). *Povodzhennia z radioaktyvnymy vidkhodamy* [Radioactive waste management]. Kyiv: Tekhnika, 368 p. (in Ukr.)

160. IAEA (2009). *Classification of Radioactive Waste: Safety Guide*. IAEA Safety Standarts, No. GSG-1 Vienna: IAEA, 68 p.

---

161. Proskura N. I., Shestopalov V. M., Zinkevich L. I., Shibetskiy Yu. A., Alekseeva Z. M., Zhebrovskaya Ye. I., (2014). Skhema klassifikatsii radioaktivnykh otkhodov dlya obespecheniya dolgosrochnoy bezopasnosti zakhroneniya [Scheme for the classification of radioactive waste to ensure long-term safety of disposal]. *Yaderna ta radiatsiina bezpeka* [Nuclear and radiation safety], vol. 62, no. 2, pp. 37—43. (in Russ.)

162. Proskura N. I., Shestopalov V. M., Zinkevich L. I., Shibetskiy Yu. A., Alekseeva Z. M., Zhebrovskaya Ye. I., Zhebrovskaya E. I. (2015). Otsenka effektivnosti vnedreniya v Ukraine novoy skhemy klassifikatsii radioaktivnykh otkhodov [Evaluation of the effectiveness of the implementation in Ukraine of a new classification scheme for radioactive waste]. *Yaderna ta radiatsiina bezpeka* [Nuclear and radiation safety], vol. 65, no. 1, pp. 34—40. (in Russ.)

163. Batiy V. G., Sizov A. A., Kholodyuk A. A. (2015). Energovydelenie toplivosoderzhashchikh materialov obekta “Ukrytie” [Energy release of fuel-containing materials of the Shelter object]. Proceedings of the *XIII Conference on High Energy Physics, Nuclear Physics and Accelerators (Kharkiv, March 16—20, 2015)*. Kharkiv: NSC KIPT, p. 60. (in Russ.)

164. Law of Ukraine “On Amendments to Certain Laws of Ukraine on Improving Legislation in the Sphere of Radioactive Waste Management” no. 208-IX dated 17.10.2019. *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy* [Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine], dated 13.12.2019, vol. 50, p. 56. (in Ukr.)

165. SIP 031 003 07 DCR 001 05. *Proektnye kriterii i trebovaniya k infrastructure NBK dlya demontazha nestabilnykh konstruksiy obekta “Ukrytie”* [Design criteria and requirements for the NSC infrastructure for dismantling unstable structures of the Shelter object]. Slavutych, 2009, 156 p. (in Russ.)

166. SIP 09-2-001 NI 03 RPT 036 06. *Metodologiya pereotsenki sostava nestabilnykh konstruksiy OU, podlehashchikh “rannemu” demontazhu* [Methodology for re-evaluating the composition of SO unstable structures subject to “early” dismantling]. Slavutych, 2013, 13 p. (in Russ.)

167. SIP 09-2-001 NI 03 RPT 037 05. *Otchet o pereotsenke sostava nestabilnykh konstruksiy OU, podlehashchikh “rannemu” demontazhu* [Report on the reassessment of the composition of the SO unstable structures subject to “early” dismantling]. Slavutych, 2014, 32 p. (in Russ.)

168. Balan O. V., Paskevych S. A., Pashynov M. V., Pidbereznyi S. S., Rudko V. M. (2019). Kontseptualni rishennia shchodo demontazhu nestabilnykh konstruksii obiekta “Ukryttia” [Conceptual solutions for dismantling unstable structures of the Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylia* [Problems of nuclear power plants’ safety and of Chornobyl], vol. 32, pp. 15—21. (in Ukr.)

169. Derenhovskyi V. V., Rudko V. M., Hovorov V. O. (2015). Rezultaty porivnialnoho analizu “doz — vytrat — vyhody” dlia dvokh variantiv “rannoho” demontazhu nestabilnykh konstruksii obiekta Ukryttia [Results of comparative analysis of “doses — costs — benefits” for two variants of “early” dismantling of unstable structures of the Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylia* [Problems of nuclear power plants’ safety and of Chornobyl], vol. 25, pp. 94—101. (in Ukr.)

---

170. VNIPIET (1990). *Raskreplenie skhemy “Ye”* [Unfastening the scheme “E”]. Contract no. 13/2104, 36 p. (in Russ.)

171. *Rekonstruktsiia obiekta “Ukrittia” DSP ChAES v chastyni demontazhu metalevoi fermy pidsylennia pivdennoi pokrivli* [Reconstruction of the Shelter object of the ChNPP Particleboard in the part of dismantling the metal truss of the southern roof reinforcement.]. Volume 6. Safety Analysis Report 301503.201.006-ZAB/IPB AES NANU. ISP NPP, NAS of Ukraine, 2016, 144 p. (in Ukr.)

172. *Rekonstruktsiia obiekta “Ukrittia” DSP ChAES v chastyni demontazhu metalevoi fermy pidsylennia pivdennoi pokrivli* [Reconstruction of the Shelter object of the ChNPP Particleboard in the part of dismantling the metal truss of the southern roof reinforcement.]. Volume 7. Report on compliance with the requirements of sanitary legislation 301503.201.007-ZVSZ/IPB AES NANU. ISP NPP, NAS of Ukraine, 2016, 115 p. (in Ukr.)

173. *Kontrolnye urovni radiatsionnoy bezopasnosti* [Reference levels of radiation safety]. SSE “ChNPP”, 2012, 20 p. (in Russ.)

174. Balan O. V., Brylka S. Gh., Derengovskyi V. V., Yehorov V. V., Pavlovskiy L. I., Rudko V. M., Khomenko D. O. (2020). *Varianty vyrishennia problemy chastyn obiekta “Ukrittia”, shcho vystupaiut za mezhi novoho bezpechnoho konfainmentu* [Options for Solving the Problem of Parts of the Shelter object Located Outside the New Safe Confinement]. *Yaderna enerhetyka ta dovkillia* [Nuclear power and the environment], vol. 19, no. 4, pp. 57—65. (in Ukr.)

175. Derengovskyi V. V. (2019). *Udoskonalenyi metod bagatokryterialnogo analizu ekologichnoi bezpeky obektiv iz radiatsiino-yadernymy tehnologiiamy* [The improved method of multicriteria analysis of environmental safety of objects with radiation and nuclear technologies] (PhD Thesis). Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 24 p. (in Ukr.)

176. Derengovskyi V. V., Nosovskiy A. V. (2018). *Udoskonalenyi metod bagatokryterialnogo analizu ekologichnoi bezpeky obektiv iz radiatsiino-yadernymy tehnologiiamy* [The improved method of multicriteria analysis of environmental safety of objects with radiation and nuclear technologies]. *Yaderna fizyka ta enerhetyka* [Nuclear physics and energy], vol. 19, no. 2, pp. 166—172. (in Ukr.)

177. Derengovskyi V. V., Rudko V. N., Govorov V. A. (2015). *Metodika provedeniya sravnitel'nogo analiza “doz — zatrat — vygod” dlya dvukh variantov “rannego” demontazha nestabilnykh konstruksiy obekta “Ukrytie”* [Method of conducting a comparative analysis of “dose-cost-benefit” for two options for “early” dismantling of unstable structures of the Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 24, pp. 110—117. (in Ukr.)

178. *Strategiya izvlecheniya TSM I obrashcheniya s RAO* [Strategy for FCM extraction and radioactive waste management]. Decision P7 of NNEGC “Energoatom”, no. SIP-PMU P7. SSE “ChNPP”, 2000, 18 p. (in Russ.)

179. *Reshenie po prototipu izvlecheniya TSM* [Solution for the prototype FCM extraction]. Decision P9 of NNEGC “Energoatom”. Kyiv, 2001. (in Russ.)



---

---

180. SIP-P-D1-19-120-STG-083-02. *Strategiya obrashcheniya s TSM i radioaktivnymi ot-khodami obekta "Ukrytie". Plan dalneyshikh deystviy* [Strategy for the management of FCM and radioactive waste at the Shelter object. The way forward]. Slavutych, 2005, 23 p. (in Russ.)

181. Batiy V. G., Podbereznyi S. S., Rudko V. N., et al. (2007). Perspektivy izvlecheniya toplivosoderzhashchikh materialov iz obekta "Ukrytie" s ispolzovaniem sistem novogo bez-opasnogo konfaynmenta [Prospects for the extraction of fuel-containing materials from the Shelter object using the New safe confinement systems]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylia* [Problems of nuclear power plants' safety and of Chornobyl], vol. 7, pp. 76—84. (in Russ.)

182. Batiy V. G., Stoyanov A. I., Shchulepnikova A. V. (2009). Modelnyy eksperiment po izvlecheniyu toplivosoderzhashchikh materialov iz obekta "Ukrytie" [Model experiment on the extraction of fuel-containing materials from the Shelter object]. Proceedings of the VI International Conference "Cooperation for solving the problem of waste" (Kharkiv, April 8—9, 2009). Kharkiv, pp. 38—40. (in Russ.)

183. Batiy V. G., Lagunencko A. S., Podberezny S. S., Shchulepnikova A. V. (2010). Problemy izvlecheniya toplivosoderzhashchikh materialov obekta "Ukrytie" [Problems of extraction of fuel-containing materials of the Shelter object]. Proceedings of the International Science and Technology Conference of Rivals "Problems related to radioactive inputs in Ukraine" (Kyiv, September 22-23, 2010). Kyiv, pp. 23—28. (in Russ.)

184. Tokarevsky V. V. (2012). Strategiya izvlecheniya toplivosoderzhashchikh materialov iz obekta "Ukrytie" [Strategy for the extraction of fuel-containing materials from the Shelter object]. *Yaderna ta radiatsiina bezpeka* [Nuclear and radiation safety], vol. 55, no. 3, pp. 43—47. (in Russ.)

185. Tokarevsky V. V. (2012). Tekhnologii izvlecheniya toplivosoderzhashchikh materialov iz obekta "Ukrytie" [Technologies for extracting fuel-containing materials from the Shelter object]. *Yaderna ta radiatsiina bezpeka* [Nuclear and radiation safety], vol. 56, no. 4, pp. 48—52. (in Russ.)

186. Batiy V. G., Shcherbin V. N., Shchulepnikova A. V. (2014). Analiz vozmozhnykh putey obrashcheniya s toplivosoderzhashchimi materialami posle zaversheniya stroitelstva novogo bezopasnogo konfaynmenta [Analysis of possible ways of fuel-containing materials treatment after the completion of the construction of a New safe confinement]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylia* [Problems of nuclear power plants' safety and of Chornobyl], vol. 23, pp. 32—44. (in Russ.)

187. Batiy V. G., Paskevych S. A., Rudko V. M., Sizov A. O., Shcherbin V. M. (2016). Maibutnie obiekta "Ukrittia" pislia stvorennia Arky [The future of the Shelter object after the construction of the Arch]. *Problemy Chornobyl'skoi zony vidchuzhennia* [Problems of the Chornobyl Exclusion Zone], vol. 15—16, pp. 4—13. (in Ukr.)

188. Batiy V. G., Pidbereznyi S. S., Rudko V. M., Shcherbin V. M. (2016). Kompiuterne modeliu-vannia pry ekspluatatsii ta peretvorenni obiekta "Ukrittii" [Computer simulation during operation and transformation of the Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobylia* [Problems of nuclear power plants' safety and of Chornobyl], vol. 27, pp. 67—79. (in Ukr.)

---

189. Balan O. V., Batiy V. G., Rudko V. M., et al. (2015). Pryntsypovi tekhnolohichni rishennia iz vyluchennia palyvovmisnykh materialiv z verkhnikh vidmitok obiekta “Ukrittia” [Principled technological solutions for the extraction of fuel-containing materials from the upper marks of the Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliia* [Problems of nuclear power plants’ safety and of Chornobyl], vol. 25, pp. 83—93. (in Ukr.)

190. Nosovskyi A. V. (2018). Pro stratehichni napriamy diialnosti z peretvorennia obiekta “Ukrittia” na ekolohichno bezpechnu systemu pislia vvedennia v ekspluatatsiiu novoho bezpechnoho konfainmentu [On strategic activities for the transformation of the Shelterobject into an ecologically safe system after the commissioning of a New safe confinement]. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine], vol. 7, pp. 16—24. (in Ukr.)

191. Balan O. V., Batiy V. G., Pidberezhnyi S. S., Rudko V. M. (2018). Osoblyvosti vyluchennia palyvovmisnykh materialiv iz nyzhnikh poznachok obiekta “Ukrittia” [Features of extracting fuel-containing materials from the lower marks of the Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsii i Chornobyliia* [Problems of nuclear power plants’ safety and of Chornobyl], vol. 31, pp. 76—84. (in Ukr.)

192. *B462 Waste Encapsulation Plant. Pre-Construction Safety Report*. TR/Z805/017. NUCEM, Harwell Nuclear Facilities Department, 2006, 108 p.

---

# ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	3
Передмова.....	5
<b>Розділ 1. Створення нового безпечного конфайнмента .....</b>	<b>10</b>
1.1 Мета створення, основні функції та етапи реалізації проєкту нового безпечного конфайнмента .....	11
1.2 Основні конструктивні й технологічні рішення.....	17
1.3 Технологічна будівля та інші допоміжні будівлі й споруди .....	33
1.4 Система основних кранів .....	35
1.5 Системи контролю та управління .....	38
1.6 Системи життєзабезпечення .....	41
1.7 Введення в експлуатацію нового безпечного конфайнмента.....	46
<b>Розділ 2. Ядерна безпека .....</b>	<b>51</b>
2.1 Паливовмісні матеріали об'єкта «Укриття» .....	53
2.2 Ядерно небезпечні скупчення .....	69
2.3 Деструкція лавоподібних паливовмісних матеріалів та прогнозні оцінки їх поведінки .....	80
2.4 Оцінка рівня ядерної безпеки об'єкта «Укриття».....	94
2.5 Оцінка наявних бар'єрів безпеки та ефективності оперативного контролю підкритичності скупчень ядерно небезпечних подільних матеріалів .....	99
2.6 Поточний стан ядерної безпеки об'єкта «Укриття» .....	103
2.7 Рекомендації щодо унеможливлення виникнення неконтрольованої самопідтримуючої ланцюгової реакції .....	106
<b>Розділ 3. Радіаційна безпека .....</b>	<b>109</b>
3.1 Зміна полів гамма-випромінювання після встановлення нового безпечного конфайнмента у проєктне положення .....	110
3.2 Радіоактивні аерозолі .....	130
3.3 Радіоактивно забруднена вода в приміщеннях об'єкта «Укриття» .....	162

---

---

<b>Розділ 4. Вплив нового безпечного конфайнмента на довкілля .....</b>	<b>185</b>
4.1 Радіоактивні аерозолі в приземному шарі повітря локальної зони Чорнобильської АЕС.....	185
4.2 Результати радіогідроекологічного моніторингу.....	195
<b>Розділ 5. Науково-технічний супровід діяльності з перетворення     об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему .....</b>	<b>214</b>
5.1 Науково-технічний супровід на етапах введення в експлуатацію та експлуатації нового безпечного конфайнмента .....	220
5.2 Програма моніторингу паливовмісних матеріалів.....	223
<b>Розділ 6. Подальше перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно     безпечну систему .....</b>	<b>234</b>
6.1 Аналіз національних нормативно-правових актів та оцінка їх достатності .....	235
6.2 Демонтаж нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» .....	248
6.3 Реконструкція частин деаераторної етажерки та машинного залу .....	265
6.4 Аналіз потенційних стратегій перетворення об'єкта «Укриття».....	271
<b>Загальні висновки.....</b>	<b>295</b>
<b>Список використаної літератури.....</b>	<b>303</b>
<b>References .....</b>	<b>319</b>

---

## Відомості про авторів



**Краснов Віктор Олександрович** — завідувач відділення ядерної та радіаційної безпеки Інституту проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України.

Свою трудову діяльність розпочав на заводі «Арсенал» у м. Києві на посадах від інженера до завідувача відділом. 1993 року перейшов працювати до Міжгалузевого науково-технічного центру «Укриття», підпорядкованого Академії наук України, де пройшов шлях від інженера до завідувача відділення.

Неодноразово брав участь у міжнародних проектах на аварійних об'єктах атомної енергетики та підприємствах з радіаційно небезпечними технологіями.

Фахівець з питань ядерної та радіаційної безпеки об'єкта «Укриття». Має глибокий та унікальний досвід з вивчення фізико-хімічних властивостей паливовмісних матеріалів в об'єкті «Укриття», розробки дистанційних технологій і агрегатів для досліджень об'єкта «Укриття» та всебічного моніторингу його впливу на стан довкілля.

Автор понад 100 наукових праць.



**Носовський Анатолій Володимирович** — д-р техн. наук, проф., чл.-кор. Національної академії наук України директор Інституту проблем безпеки атомних електростанцій НАН України.

Трудову та наукову діяльність розпочав у філії Інституту атомної енергії ім. І. В. Курчатова в м. Сосновий Бор Ленінградської обл. У складі Управління будівництвом № 605 (УС-605) Мінсередмашу СРСР брав участь у ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС, пройшовши шлях від посади інженера до заступника генерального директора. Створив Славутицьку лабораторію міжнародних досліджень і технологій, яка забезпечувала науковий супровід процесу зняття з експлуатації енергоблоків Чорнобильської АЕС.

Обіймав посаду директора Славутицької філії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». Працював заступником директора Державного науково-технічного центру з ядерної та радіаційної безпеки Держатомрегулювання України.

Фахівець у сфері безпеки ядерних технологій, радіаційного захисту, протиаварійного реагування, зняття з експлуатації ядерних установок та перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему.

Автор понад 300 наукових праць.



---

**Паскевич Сергій Анатолійович** — кандидат біологічних наук заступник директора з наукової роботи Інституту проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України.

Із 1995 року працював у Чорнобильській зоні відчуження, у відділі радіології та рекультивації Науково-виробничого об'єднання «Прип'ять», яке згодом реформувалось у Державне спеціалізоване підприємство «Чорнобильський радіоекологічний центр». З 2002 року обіймав посаду молодшого наукового співробітника в Міжгалузовому науково-технічному центрі «Укриття».

Фахівець у сфері радіаційного захисту та радіоекології. Брав участь у розробці проектів з будівництва й реконструкції ядерно та радіаційно небезпечних об'єктів на території Чорнобильської зони відчуження, зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему. Тривалий час працював на посаді технічного експерта з оцінки проектних рішень будівництва нового безпечного конфайнмента. Займається науковими дослідженнями з питань застосування сучасних програмних комплексів щодо виведення ядерно та радіаційно небезпечних об'єктів з експлуатації.

Автор понад 100 наукових праць.



**Рудько Володимир Михайлович** — завідувач відділення проектування об'єктів з радіаційно-ядерними технологіями Інституту проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України.

Трудову діяльність розпочав у Науково-дослідному інституті будівельних конструкцій (НДІБК) на посадах інженера, молодшого наукового співробітника, наукового співробітника. Із 1992 року в складі групи фахівців цього підприємства досліджував технічний стан конструкцій об'єкта «Укриття». 1994 року був призначений керівником новоствореного відділу будівельних конструкцій, спільного підрозділу МНТЦ «Укриття» і НДІБК, а 1995 року очолив відділення проектування об'єктів з радіаційно-ядерними технологіями Інституту проблем безпеки атомних електростанцій.

Учасник ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС.

Фахівець у сфері розробки технологій та технічних засобів з безпечного поводження з радіоактивними відходами та відпрацьованим ядерним паливом. Розробник низки реалізованих проектів, що стосуються зняття з експлуатації енергоблоків Чорнобильської АЕС, поточної безпечної експлуатації об'єкта «Укриття» та його перетворення на екологічно безпечну систему.

Автор понад 150 наукових праць.



---

---

Наукове видання

**Краснов** Віктор Олександрович,  
**Носовський** Анатолій Володимирович,  
**Паскевич** Сергій Анатолійович,  
**Рудько** Володимир Михайлович

**ОБ'ЄКТ «УКРИТТЯ»  
В УМОВАХ НОВОГО  
БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТА**

За загальною редакцією **А. В. Носовського**

Редактор *Н. О. Білокриницька*  
Технічний редактор *О. П. Толкач*  
Комп'ютерна верстка *О. П. Толкач*

Підп. до друку 06.04.2021. Формат 70×90 1/16 Папір крейд.  
Гарнітура Minion Pro. Друк офсет. Ум. друк. арк. 25,16  
Наклад 300 пр. Зам. №

Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України  
Київська обл., 07270, м. Чорнобиль, вул. Кірова, 36а  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2114 від 25.02.2005 р.

Віддруковано в друкарні ПП «Видавництво "Фенікс"»  
03067, м. Київ, вул. Шутова, 136.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 271 від 07.12.2000 р.

---

---

**The Shelter** Object in Conditions of the New Safe Confinement / V. O. Krasnov, A. V. Nosovskyi, S. A. Paskevych, V. M. Rudko ; edited by A. V. Nosovskyi. — Chornobyl : the ISP NPP of the NAS of Ukraine, 2021. — 344 p.

**ISBN 978-966-02-9577-3**

In the monograph, based on the results of many years of scientific researches on the occasion of the 35th anniversary of the Chornobyl disaster, the New Safe Confinement (NSC), enclosing perimeter, technological and auxiliary buildings and communications, main crane system, life support, safety and control systems are described. The issues of nuclear and radiation safety in the NSC conditions are considered, the dynamics of neutron activity and fuel-containing materials temperature in the process of humidity and temperature changes, which occurred after the Arch covered the Shelter object, are given. The directions of improvement of efficiency of nuclear safety maintenance are shown. The change of gamma radiation fields after the NSC installation in the design position, activity of radioactive aerosols and water accumulations in the premises of the object was estimated. The impact of the Shelter object in the conditions of Confinement on the environment is analyzed, the programs of scientific and technical support of the activity on the object transformation into an ecologically safe system are considered. Further works on dismantling of unstable structures of the Shelter object, reconstruction of the building parts extending beyond the enclosing perimeter, as well as potential scenarios of the Shelter object transformation are described.

The book is intended for specialists of nuclear power plants, scientific and engineering employees of the services of nuclear safety and radiation protection, emergency response as well as higher education students. It can be useful for wide range of readers who want to acquire and systemize their knowledge on considered issues.