

УДК 621.039.74

ШАБАЛІН Б. Г.<sup>1</sup>, ЛАВРИНЕНКО О. М.<sup>1,2\*</sup>, МІЦЮК Н. Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»

<sup>2</sup> Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України

## ЗАХОРОНЕННЯ КОРОТКОІСНУЮЧИХ НИЗЬКО- І СЕРЕДНЬОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ: ПРАКТИКА СВІТОВОГО ДОСВІДУ

*В статті узагальнено і проаналізовано основні підходи та практичний досвід закордонних країн щодо захоронення короткоіснуючих низько- і середньоактивних відходів. Показано їх місце у категорії низькоактивних відходів за рекомендованою класифікацією МАГАТЕ, для яких передбачено захоронення у приповерхневих сховищах. На сьогодні в країнах, які експлуатують ядерні установки і розвивають ядерні технології, відсутній єдиний підхід до захоронення таких відходів. Тип сховища та його конструкційно-технологічні рішення зумовлені специфікою самих відходів, характером майданчика, державною стратегією в ядерній галузі, а також соціальними й економічними чинниками. На теперішній час розроблено кілька типів сховищ для захоронення короткоіснуючих низько- і середньоактивних відходів: відносно прості приповерхневі сховища траншейного типу; приповерхневі сховища модульного типу з ускладненими, порівняно з траншейним типом, системою інженерних бар'єрів і критеріями вибору вміщуючих порід (природних бар'єрів); геологічні сховища, які, переважно, будуються в гірничих виробках із складною системою тунелів і бар'єрного захисту. В складі елементів інженерних бар'єрів широко застосовуються бентонітові глини. В найпростішому випадку приповерхневих сховищ бентонітовий шар слугує матеріалом основи сховищ і сприяє зменшенню фільтрації та збільшенню сорбції радіонуклідів і інших компонентів. При організації геологічних сховищ бентонітовий шар сприяє зменшенню фільтрації води у сховище, збільшенню сорбції радіонуклідів, запобіганню руйнування бетонних конструкцій при зсуві вміщуючи порід та, при руйнуванні цементно-бетонних конструкцій інженерних бар'єрів, призводить до зменшення виносу радіонуклідів із сховищ у навколишнє природне середовище. В роботі наведено приклади різних типів сховищ країн світу.*

**Ключові слова:** короткоіснуючі низько- та середньоактивні відходи, приповерхневі сховища, геологічні сховища, бентонітовий шар

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2023.276449

\*Corresponding author: alena.lavrynenko@gmail.com

Received 25 January 2023; Accepted 23 March 2023

Згідно Закону України [1] у новій класифікації радіоактивних відходів (РАВ) виділяють чотири класи відходів, серед яких виділено низькоактивні відходи (НАВ). Клас НАВ підлягає захороненню у сховищах поверхневого / приповерхневого типу, збудованих із системою багатобар'єрного захисту. Цей клас НАВ приблизно відповідає типу короткоіснуючих низько- і середньоактивних відходів (КІ НСАВ), виділеному в ранніх класифікаціях [2-4].

На сьогодні в Україні створюється I і II черги комплексу виробництв «Вектор» в Чорнобильській зоні відчуження, який має забезпечувати прийом РАВ всіх класів, зокрема НАВ (КІ НСАВ), із різних джерел їх утворення і місць тимчасового зберігання. На майданчику «Вектор» для захоронення КІ НСАВ введено в експлуатацію поверхневі / приповерхневі сховища – пункт захоронення радіоактивних відходів (ПЗРВ) «Буряківка» (I черга) і спеціально обладнане приповерхнєве сховище твердих РАВ (СОПСТРВ) (II черга), а два (ТРВ-1 і ТРВ-2) знаходяться на стадії отримання ліцензії на право провадження діяльності з експлуатації. Водночас, значні оціночні обсяги накопичених НАВ (КІ НСАВ) і які будуть накопичуватись (близько 100000 м<sup>3</sup> [5]) потребують не тільки розширення існуючих сховищ, а також створення нових.

З огляду на це, актуальною метою дослідження є аналіз та узагальнення світового досвіду щодо захоронення короткоіснуючих низько- і середньоактивних відходів у поверхневих і приповерхневих сховищах.

**Місце короткоіснуючих низько- і середньоактивних відходів у класифікації радіоактивних відходів МАГАТЕ та умови їх захоронення**

На сьогоднішній день у світовій практиці не існує єдиної класифікації радіоактивних відходів і різні країни користуються різними класифікаціями (РАВ, RW) у відповідності до прийнятих ними критеріїв. За новою класифікацією РАВ МАГАТЕ [6] введена категорія низькоактивних відходів (НАВ, LLW), що замінює категорію коротко існуючих низько- і середньоактивних відходів (КІ НСАВ), яку досі використовують у багатьох країнах (рис. 1). Ця категорія охоплює широкий спектр РАВ і може включати коротко існуючі  $\beta$ - і  $\gamma$ -випромінюючі радіонукліди (період напіврозпаду до 30 років) з вищими рівнями активності, порівняно з дуже низькоактивними (ДНАВ, VSLW) і середньоактивними (САВ, ILW) відходами. Основна частина радіонуклідів НАВ – короткоіснуючі, з питомою активністю до  $10^5$ - $10^6$  Бк/г. Конкретних значень активності МАГАТЕ не встановлює, а рекомендує прийняти їх на національному рівні.

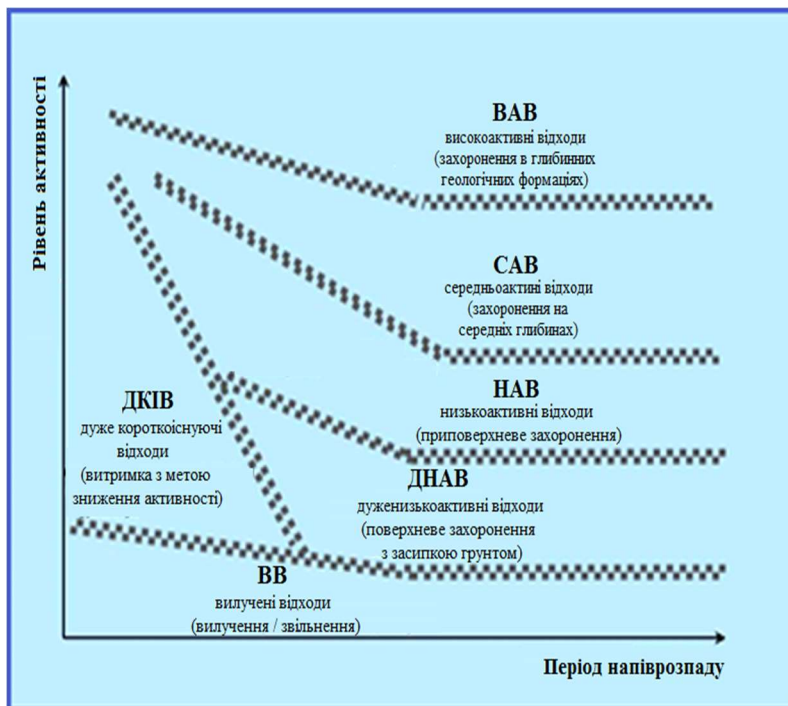


Рис. 1 – Вибір типу сховища та глибини на основі характеристик відходів [6].

Щорічно у світі утворюється близько 50 млн. м<sup>3</sup> твердих і стверділих НАВ, з яких близько 80 % надходить на захоронення до ліцензованих сховищ [7]. Такі відходи потребують надійної ізоляції (довгострокового зберігання і захоронення) на період до декількох сотень років і можуть бути захоронені в приповерхневих сховищах оснащеною системою інженерних бар'єрів (СІБ), створеною на основі сучасних технологій. За визначенням МАГАТЕ, приповерхнєве сховище – це споруда, призначена для захоронення РАВ на поверхні Землі або на глибині кількох десятків метрів [8]. Невелика глибина розташування і близькість зони захоронення відходів до сфери діяльності людини роблять приповерхневі сховища непридатними для захоронення високоактивних відходів (ВАВ, HLW) і відходів, які містять довгоіснуючі радіонукліди (ДІ НСАВ, ILW). В цілому, тип сховища та його облаштування визначаються специфікою самих відходів, характером майданчика, державною стратегією, а також соціальними й економічними факторами. Сховище має бути забезпечене системою бар'єрів (інженерних і природних). Порушення цілісності одного із бар'єрів або можливий зовнішній вплив природного або техногенного походження не повинні призвести до зниження рівня довгострокової безпеки захоронення. Країни, які не мають таких сховищ для захоронення, вимушені створювати сховища проміжного зберігання. Питання щодо створення таких сховищ є предметом

національної політики. Оскільки КІ НСАВ містять радіонукліди, які залишаються потенційно небезпечними впродовж сотень років, в основі інженерно-технічних рішень приповерхневого захоронення має бути покладена концепція багатобарерності, що забезпечує надійну ізоляцію відходів від біосфери.

Незалежно від проекту сховища, на першому етапі проектування проводять визначення форм і характеристик РАВ, які будуть захоронені, що кількісно характеризується в критеріях прийнятності відходів для окремого майданчика. Всі діючі сховища мають затверджені критерії прийнятності відходів, проте критерії розрізняються залежно від характеристик майданчика і рішень національної влади. Зазвичай, передбачається, що приповерхнє сховище підлягатиме активному або пасивному контролю принаймні впродовж 300 років, поки рівень активності відходів не зменшиться щонайменше в 1000 разів. Згідно стандартів міжнародної агенції енергетики [9] система бар'єрів сховища РАВ повинна: 1. забезпечувати захоронення РАВ на час їх потенційної небезпеки з урахуванням можливих зовнішніх впливів природного і техногенного походження, а також фізичних і хімічних процесів, які протікають у сховищі; кількість та призначення бар'єрів визначають з урахуванням результатів досліджень властивостей матеріалів бар'єрів та прогнозу оцінки безпеки системи захоронення РАВ; 2. перешкоджати ненавмисному втручанню людей та тварин.

Інженерні бар'єри сховища РАВ повинні виконувати свої функції після його закриття протягом встановленого згідно проекту періоду без технічного обслуговування та ремонту і запобігати контакту упаковок РАВ з природними водами, руйнуванню упаковок РАВ під зовнішнім впливом природних та техногенних чинників, поширенню радіонуклідів у вміщуючі породи.

До основних бар'єрів сховища належать довговічні контейнери, монолітні залізобетонні конструкції та консервуюче покриття, до другорядних, відповідно, форми РАВ, геологічне середовище і засоби дренажу фільтрату. Для кожного потенційного майданчика будівництва сховища необхідно провести ряд досліджень, зокрема:

1. геолого-гідрогеологічні дослідження в районах передбачуваного розміщення сховища;
2. фізико-хімічні дослідження властивостей відходів, що підлягають захороненню; матеріалів окремих елементів конструкції сховища та порід навколишнього масиву з метод отримання характеристик їх здатності утримувати продукти розкладу РАВ; захисних бар'єрів сховища на тривалий проміжок часу для розробки вимог щодо стійкості відходів;
3. науково-технічне обґрунтування СІБ на основі методик оцінки безпеки, зокрема, розробки основних структурних елементів системи, а також вимог до окремих елементів конструкції сховища, що є ключовими для забезпечення захоронення, визначення геометричних, фізико-хімічних та інших характеристик захисних бар'єрів;
4. досліду перевірку елементів конструкції сховища, вибраних матеріалів та обладнання.

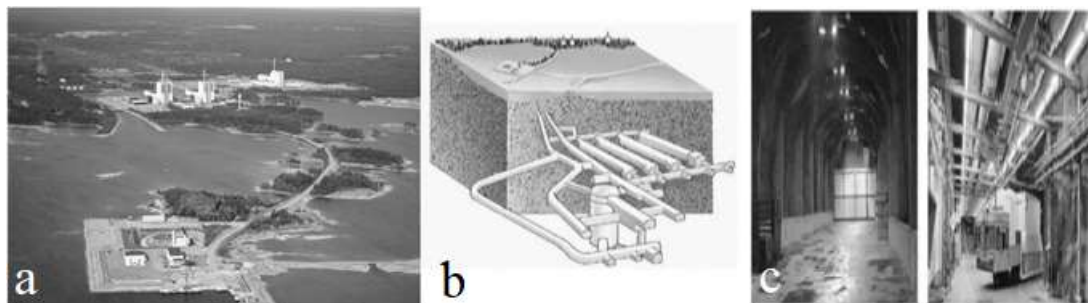
Для сховища НАВ курганного типу основними елементами конструкції є: а) *система бар'єрів покриваючого екрана*, основною функцією якої є протидія потрапляння в зону захоронення інфільтруючих атмосферних опадів, оберігання її основних елементів від вітрової і водної ерозії. Розраховані характеристики окремих елементів покриваючого екрана мають бути перевірені експериментально; б) *система бар'єрів підстилаючого екрана*, яка повинна протидіяти міграції радіонуклідів із РАВ, забезпечуючи впродовж усього необхідного терміну ізоляції РАВ встановлений рівень дозових навантажень, прийнятий для стадії захоронення.

Залежно від властивостей вміщуючої породи проробляються наступні рішення підстилаючого екрана: а) для малопроникної породи (глина, суглинок): при достатній ізолюючій здатності вона може слугувати природним бар'єром, що забезпечує захоронення; б) для високопроникної породи (пісчаний ґрунт), що характеризується високою дренажною здатністю, передбачається створення протиміграційного екрану із суміші піску з природним сорбентом, наприклад, бентонітом. Геометричні та інші характеристики екрана також є визначальними при оцінці безпеки залежно від питомої активності та радіонуклідного складу РАВ. Важливе значення має система дренажу води, що потрапила в сховище в період будівництва і завантаження РАВ. Проблемою для приповерхневих сховищ є наявність ґрунтових вод, тому максимальна увага повинна приділятися їх гідроізоляції.

На сьогодні у країнах-членах МАГАТЕ було побудовано і експлуатуються більше ста сховищ для захоронення КІ НСАВ, а понад сорок сховищ знаходяться на етапі розробки [10].

**Короткий огляд сховищ, що використовуються для захоронення короткоіснуючих низько- і середньоактивних відходів**

**Швеція.** Концепція остаточного захоронення передбачає захоронення всіх РАВ у глибоких геологічних сховищах. Впродовж 1970-х років було прийнято рішення про створення об'єктів захоронення для КІ НСАВ і тому проміжні сховища для НАВ на АЕС не організовувались [11]. Захоронення КІ НСАВ проводять у сховищі СФР (Slutförvaretförkortlivat radioaktivt avfall, Forsmark) загальною місткістю 63000 м<sup>3</sup>, експлуатацію якого започатковано у 1988 р. Заплановано розширення сховища до 200000 м<sup>3</sup> переважно для відходів після виведення з експлуатації АЕС. Розширення сховища заплановано на 2020-ті роки. Дата його закриття не визначена. Сховище знаходиться неподалік АЕС Форсмарк і споруджене в кристалічних породах на глибині близько 60 м нижче рівня Балтійського моря (рис. 2). Після закриття сховища проведення будь-яких заходів відомчого контролю не передбачено. Відходи захоронюють у підземних виробках різної конфігурації (4 камери), адаптованих до конкретного типу РАВ. Відходи, що мають найвищу активність, ізолюють у циліндричному бункері діаметром 26 м, облицьованому шаром бетону товщиною близько 0,8 м. Глибина бункера становить 50 м. Бункер встановлений на основі з шару піску і бентоніту. Простір між зовнішніми стінками бункера і вмщуючими породами також заповнений шаром спресованого бентоніту товщиною 1,2 м, який слугує компонентом протифільтраційного бар'єра. Крім функції утримання надходження води до сховища, цей шар запобігає руйнуванню бетонних конструкцій при зсувах вмщуючи порід, а також сприятиме зменшенню виносу радіонуклідів із сховища у геологічне середовище у випадку руйнування бетонного бар'єра. Простір між упаковками з відходами та стінками шахт заливають бетоном розчином і/або заповнюють бетонною сумішшю. Для камер з НАВ засипка не запланована. Компоненти СІВ у сховищі виготовлені з трьох різних матеріалів (бетон, бентоніт, гравій вмщуючої породи), кожен з яких буде сприяти утриманню радіонуклідів. На грудень 2016 р. в означеному сховищі захоронено приблизно 39000 м<sup>3</sup> відходів.



**Рис. 2 – Майданчик СФР, наземні конструкції (на задньому плані – АЕС Форсмарк (а), загальний вигляд сховища (б) та підземні виробки для захоронення (с) [Джерело: SKB]**

**Бельгія.** На сьогодні КІ НСАВ (категорія А) безпосередньо утворюються та обробляються на території АЕС. В 1998 р. бельгійський уряд прийняв рішення щодо розміщення КІ НСАВ у постійно діючих сховищах – поверхневому або глибинному (у глинах формації Boom). В сховищах передбачається захоронення або видалення відходів у будь-який час впродовж різних фаз їх функціонування. Проектом приповерхневого сховища в Десселі (Dessel) передбачено розміщення як усіх накопичених відходів категорії А, так і тих, які згідно з прогнозами, будуть утворені в майбутньому (рис. 3) [12]. Захоронення відходів у сховищі відбувається з 2016 р. Загальна місткість сховища становить 69 900 м<sup>3</sup>. Відходи розміщені в бетонних модулях висотою 11, довжиною 27 і шириною 25 м з покрівельним накриттям та товщиною стін 0,7 м. Наразі РАВ категорії А зберігаються у бетонних контейнерах залежно від габаритів відходів. Протягом усього процесу захоронення та після розміщення відходів всі модулі будуть захищені від атмосферних опадів покрівельним накриттям, яке, при закритті сховища, буде замінене на остаточне багатшарове покриття потужністю близько 4,5 м, складене різними природними матеріалами (піском, гравієм і глиною). При цьому непроникна верхня плита модуля захоронення, виконана із армованого бетону, буде відігравати роль другого інфільтраційного бар'єра.

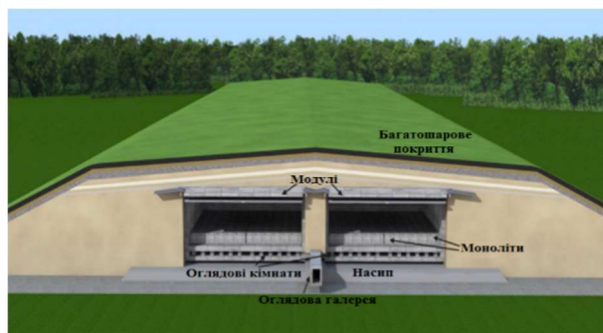


Рис. 3 – Основні конструкційні елементи сховища Дессель

**Німеччина.** Німецька концепція передбачає захоронення всіх видів РАВ у глибоких геологічних сховищах. На даний час реалізуються три проекти щодо захоронення РАВ з незначним залишковим тепловиділенням (майданчики «Конрад», «Ассе» і «Морслебен») (Рис.4) [13]. Сховище для захоронення НСАВ *Морслебен* (Morsleben) (рис. 4а) збудовано в шахтних виробках колишньої соляної шахти на глибині від 400 до 600 м. Шахту використовували як сховище НСАВ в період 1971-1998 рр. На сьогодні триває процес ліцензування етапів закриття сховища та виведення його з експлуатації. Відходи розміщені переважно в сталевих бочках і циліндричних бетонних контейнерах ємністю 200, 280, 400 і 570 л, які складені у встановленому порядку в камерах, розмірами 30 x 100 м. Для даного сховища фіксується низька швидкість просочування води (~12 м<sup>3</sup>/рік). Камери розміщення не заповнені засипкою. Частина виробок була залита бетоном (~935000 м<sup>3</sup>), а інша залишена відкритою для циркуляції газу, який утворюється в результаті деструкції органічних матеріалів у відходах та сталевих контейнерах.



Рис. 4 – Сховища відходів НСАВ Морслебен (а), Конрад (b), Ассе II (с).

Сховище тунельного типу *Конрад* (Konrad) (Рис. 4b) розташоване на глибині 800-1000 м в порожнях оолітової вапнякової гірської породи та використовує інфраструктуру колишньої залізничної шахти. Означену шахту було обрано для створення сховища внаслідок сприятливих геологічних умов – наявності природного бар'єру товщиною 200-400 м, який складається з глинистих порід з низькою проникністю та ізолює залізні руди від залягаючих вище ґрунтових вод. Початок експлуатації сховища було заплановано на 2022 р. На першому етапі передбачено захоронення 63000 м<sup>3</sup> нетепловідляючих НСАВ з подальшим розширенням до 303000 м<sup>3</sup>. Об'єкт має дві шахти: одна для доступу персоналу і вхідної вентиляції, інша – для маніпуляції з відходами і вивідної вентиляції. На першому етапі збудовано п'ять нових камер розміщення. Відходи упаковані у невелику кількість стандартних контейнерів: сталеві ящики (4-12 м<sup>3</sup>), чавунні (1-1,3 м<sup>3</sup>) і бетонні (~1,2 м<sup>3</sup>) контейнери. Зовнішні контейнери можуть містити кілька менших контейнерів з бочками, ємністю 200 або 400 л. Зазвичай, проміжки всередині контейнерів заливають бетоном. Камери захоронення заповнюють сумішшю щебню з бетоном.

В переобладнаній під сховище колишній соляній шахті *Ассе II* (Asse II) (рис. 4c) захоронення проводиться у шахтних виробках на глибинах 511, 725, і 750 м. За період експлуатації шахти було видобуто ~5 млн м<sup>3</sup>

кам'яної солі і калійних мінералів. Більша частина шахтового простору була залишена незасипаною. В Ассе II заховують нетепловиділяючі НСАВ. Захоронення НАВ почалося в 1967 р., а САВ – в 1972 р. Шахта працювала як сховище до 1978 р. Відходи локалізовані переважно в 200-л бочках. НАВ складені у встановленому порядку, в той час як САВ накидані у “купу”. Камери розміщення не мали засипки, що призвело до сповзання солі та викликало конвергенцію і перерозподіл напружень навколо камер, що, в свою чергу, відкрило шляхи для потрапляння у сховище підземних вод. З 1988 р. спостерігається постійне надходження насиченого соляного розчину у периферійні зони шахти. Для запобігання екологічної катастрофи планується вилучення всх відходів і їх перепакування для захоронення у сховищі Конрад. З метою запобігання подальшому руйнуванню частин шахти на період вивантаження відходів для заповнення було використано ~1,75 млн м<sup>3</sup> солебетону. Водночас, сповзання солі та протікання підземних вод триває. На теперішній час сховище містить ~47000 м<sup>3</sup> НСАВ. В 2013 р. було прийнято закон про прискорене вилучення РАВ та закриття шахти Ассе II. Відповідно до поточних планів роботи вилучення відходів мають розпочатися не раніше 2033р.

**Велика Британія.** Основним сховищем для захоронення твердих НАВ є приповерхнє сховище *Дрігг* (Drigg) (рис. 5) [14]. З 1959 р. відходи заховували у товщі глин в траншеях на глибині 6-8 м. Їх об'єм складав 800000 м<sup>3</sup>. Використання глиняних траншей було припинено в 1995 р. і на цей час вони закриті. З 1988 р. почалась експлуатація двох бетонних сховищ, в яких міститься 400000 м<sup>3</sup> відходів. Заплановане розширення бетонних сховищ до 600000 м<sup>3</sup> (1,8 млн м<sup>3</sup> для всього об'єкта). У сховищі є дві бетонні камери, розмірами 180 x 200 x 5 м, які розділені на 3 відсіки, кожен шириною 60 м. Камери збудовано на бетонній основі із спроектованою дренажною системою. Більшість відходів ущільнені і залиті бетонним розчином у контейнерах. Тимчасове накриття при завантаженні відходів у сховище не використовується. Дощову воду, що потрапляє у сховище під час завантаження відходів, збирають і аналізують. При закритті відсіків, проміжки між контейнерами та навколо них заливають бетонним розчином. Сховища будуть захищені багатшаровою системою інженерних накриттів. З підвищенням вимог до безпеки систему захисних бар'єрів сховища було удосконалено: для посилення нижнього природного підстиляючого бар'єру встановлено глиняний екран із суміші бентоніту і вапняку, а для попередження горизонтального потоку – захисні стінки з бентоніту, портландцементу та гранульованого доменного шлаку. Бетонні плити, які є основою таких камер, встановлюють на шар ущільненої глини. Заплановано моніторинг і регулюючий контроль сховищ протягом 100 років після закриття. Дата їх закриття не визначена. Загальний об'єм відходів у сховищі на квітень 2016 р. склав 1 млн м<sup>3</sup>.

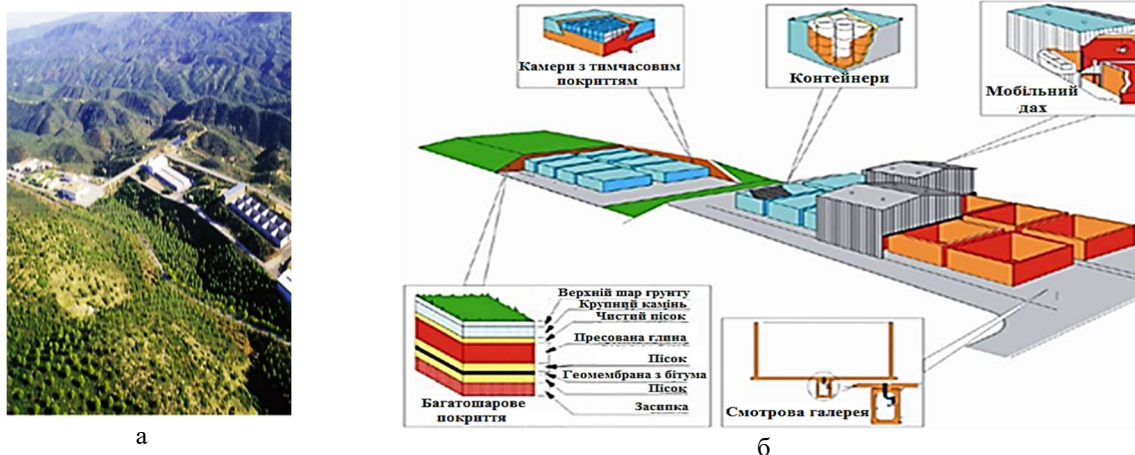


Рис. 5 – Пункт приповерхнєвого заховування НАВ Дрігг:

- 1 – в'їзд на майданчик; 2 – конгрес-центр; 3 – територія проживання диких тварин і рослин; 4 – під'їзний рейковий шлях; 5 – адміністративні корпуси; 6 – установка цементування; 7 – сім траншей заховування; 8 і 9 – дві камери заховування

**Іспанія.** Приповерхнєве сховище *Ель Кабріль* (El Cabril) об'ємом 37000 м<sup>3</sup> спроектоване для заховування всіх НСАВ країни було введено в експлуатацію в 1992 р. [15]. Передбачено його розширення до 90000 м<sup>3</sup>. Дату закриття не визначено. Система заховування КІ НСАВ складається з бетонних контейнерів, які розміщені у бетонних відсіках (рис. 6). В галереях контролю, споруджених під відсіками, є система контролю стоків. Зазвичай, відходи ущільнені та/або зацементовані у 200-л бочках або 1,3 м<sup>3</sup> сталевих контейнерах. Бочки і контейнери інкапсулюють у бетонні ємності (11 м<sup>3</sup>), приблизно 25 т бруто. Бетонні ємності

розміщують у бетонні відсіки розміром  $24 \times 19 \times 9$  м. Рухоме накриття захищає відкриті сховища під час завантаження відходів, а проміжки між контейнерами засипають гравієм. Багатошарова система накриття має складатися з різних мембран і дренажних шарів. Підстилаючий екран сховища складається з компактованого шару місцевої глини товщиною 1 м і шару геомембрани товщиною 3 см. У сховищі передбачено потенційну можливість вилучення контейнерів з відходами. При закритті сховища споруджується перекриття з шарів водонепроникних і дренуючих матеріалів. Таким чином, система багаторівневого захисту складається з трьох бар'єрів: 1) бетонних контейнерів з відходами; 2) відсіків для захоронення, перекриття і мережі контролю просочування води; 3) геологічного бар'єру – оточуючих порів, які обмежують вплив можливого аварійного витоку при руйнуванні перших двох бар'єрів. На кінець 2016 р. в Ель Кабріль було захоронено приблизно  $32000 \text{ м}^3$  РАВ.



**Рис. 6 – Майданчик сховища Ель Кабріль (а) та концепція захоронення НСАВ у сховищі (б)**  
[Джерело: Enresa] Об'єднати і вставити на рис а і б

**Канада.** Канадська стратегія поводження з НСАВ передбачає їх захоронення у приповерхневому або глибинному сховищі [16]. Для захоронення КІ НСАВ в країні будується приповерхнєве сховище курганного типу на майданчику *Чалк Ривер* (Chalk River), перша черга якого введена в експлуатацію у 2020 р. Ємність майбутнього сховища розрахована на 1 млн  $\text{м}^3$ . Глибина сховища складає від 1 до 8 м. Сховище має 10 камер для захоронення (максимум  $15000 \text{ м}^2$  відходів на камеру) і СІБ для ізоляції від навколишнього природного середовища. Покриваючий і нижній екрани мають мінімальну товщину 2,05 м і складаються з кількох шарів щєбню, піску, спресованої глини та геомембран (рис. 7) [17]. Висота захоронених у сховищі відходів становить приблизно 15 м. Плановий строк експлуатації сховища складає 50 років, закриття – 30 р., регулюючий контроль від 300 до 500 років після закриття. Будівництво другої черги сховища заплановано на 2040 р. За концепцією захоронення РАВ заплановано будівництво геологічного сховища (наприклад, на майданчику АЕС «Брюс»), яке зможе вмістити близько  $160\,000 \text{ м}^3$  НСАВ [16]. Камери захоронення заплановано розташувати на глибині 680 м у малопроникних вапнякових породах, потужністю 200 м. Формация, що залягає вище сховища, представлена шаром малопроникних сланцевих порід потужністю 200 м.

**Фінляндія.** Концепція країни передбачає захоронення всіх РАВ у глибоких геологічних сховищах [18]. Утворені в результаті експлуатації АЕС КІ НСАВ накопичуються в розташованих на приреакторних майданчиках тимчасових приповерхневих сховищах і передаються у сховища *Олкїлуото* (Olkiluoto) і *Ловїйса* (Loviisa). На тимчасових майданчиках сховищ розташовані установки кондиціонування відходів. В цілому, конструкції сховищ аналогічні шведським.



Рис. 7 – Ізоляційні бар'єри приповерхневого сховища Чалк Ривер (NSDF Chalk River).

Сховище *Ловіса*, яке застосовується для глибинного захоронення РАВ, розташоване на глибині близько 110 м у гранітних вміщуючих породах і складається з двох тунелів для захоронення твердих КІ НАВ та камери для іммобілізованих КІ САВ. Початок експлуатації для НАВ 1998 р., для САВ – 2013 р. Розширення сховища проведено у 2010 та 2012 роках. Закриття сховища заплановане на 2055 р. На першому етапі експлуатації захоронено 3600 м<sup>3</sup> НАВ і, додатково, при розширенні сховища, планується розмістити ~6400 м<sup>3</sup> НАВ і 5000 м<sup>3</sup> САВ. КІ НАВ АЕС ущільнюють і / або упаковують у 200-л сталеві бочки, а смоли і шлами цементують в циліндричні бетонні контейнери. Розміри НАВ камер складає 6 x 5 x 100 м. При закритті НАВ камери не засипають. Камери для САВ – це тимчасові бетонні споруди траншейного типу розміром 14 x 11 x 70 м. Бетонні упаковки відходів складають по 5 вертикально. Після заповнення кожного шару камери заливають бетонним розчином, а після завершення заповнення шари покривають бетоном. Порожини заповнюють подрібненою породою.

Призначене для геологічного захоронення РАВ сховище *Олкілуото* розміщено на приреакторному майданчику АЕС Олкілуото. Сховище бункерного типу розміщене на глибині 60-95 м в тоналітовій корінній породі (рис. 8). Для НАС і САВ збудовано два бункери ємністю 5000 м<sup>3</sup> і 3500 м<sup>3</sup>, відповідно. В майбутньому планується збудувати ще 4 додаткових бункери. Початок експлуатації сховища – 1992 р. Його розширення



заплановане для відходів нового реактора і відходів, отриманих при виведенні з експлуатації існуючих АЕС. Закриття сховища планується провести після виведення з експлуатації останнього реактора АЕС. Бункер для НАВ виготовлений з бетону (внутрішній діаметр – 24 м, висота – 34 м). Відходи упаковані в 200-л бочки; 1,4 м<sup>3</sup> сталеві контейнери; 3,9 м<sup>3</sup> бетонні ємності (місткістю 12 бочок) або 5,2 м<sup>3</sup> бетонні ємності (місткістю 16 бочок). Для САВ використовують товстостінні бетонні бункери з боксами ємністю 5,2 м<sup>3</sup>, які вміщують 16 бочок відходів. Бункери містять 31 ярус укладених штабелями бетонних ємностей. Після закриття сховища простір над бункерами буде заповнений подрібненою породою. Звітний об'єм на кінець 2016 р. становив 5681 м<sup>3</sup> КІ НСАВ.



Рис. 8 – Сховище захоронення КІ НСАВ у Олкілуото.

**Франція.** На сьогодні країна має понад 50-річний досвід експлуатації приповерхневих сховищ захоронення КІ НСАВ [19]. Французька концепція приповерхневого захоронення таких відходів передбачає систему з численними рівнями захисту для ізоляції РАВ від населення і довкілля. Вибір майданчика зумовлений його геологією, яка відповідала б вимогам безпеки: наявність піщаної товщі поверх шару непроникних глин. Багаторівнева система захисту складається із:

- першого бар'єра – фізичної форми відходів. Відходи повинні бути твердими та вкладеними в герметизуючу оболонку або бетонний контейнер. При необхідності їх можна витягти з відсіку для захоронення.
- другого бар'єра – інженерних конструкцій, які повинні запобігти виносу радіонуклідів з упаковок відходів водою.
- третього бар'єра – вміщуючої породи майданчика, який, в разі руйнування перших двох бар'єрів, повинен обмежити до прийняттого рівня вплив при виході РАВ.

В період з 1969 до 1992 рр. відходи захоронували у приповерхневому сховищі *Сантр-де-Ла-Мани* (Centre de La Manche), яке являє собою наземне сховище курганного типу з бетонними камерами для захоронення КІ НСАВ в упаковках різного типу. Закриття сховища відбулося в 1997 р. На цей час сховище перебуває під тривалим моніторингом для здійснення регулюючого контролю на період 300 років. Контейнери з відходами розміщені безпосередньо на бетонних плитах або в бетонних бункерах, збудованих на плитах. Проміжки між контейнерами заповнені піском, гравієм або бетоном. Багатошарова система накриття складається з різних мембран і дренажних шарів.

Сховище *Центр де л'Об* (Centre de l'Aube) – наземне сховище з бетонними камерами (рис. 9). Перші упаковки з КІ НСАВ були прийняті для проміжного зберігання у січні 1992 р. (початок експлуатації). З 1994 р. у сховищі захоронюються всі КІ НСАВ Франції. Об'єм сховища складає 1000000 м<sup>3</sup> (400 камер). Дату закриття не визначено. Як правило відходи ущільнені і / або заповнені в контейнери. Контейнери з відходами розміщені безпосередньо в бетонних камерах розміром 25 × 25 × 8 м. Рухоме накриття захищає відкриті камери під час завантаження відходів. Простір між контейнерами заповнено піском, гравієм або бетонним розчином. Камери заливають бетоном. Багатошарова система накриття складається з різних мембран і дренажних шарів. На кінець 2016 р. загальний об'єм захоронених відходів складає ~325000 м<sup>3</sup> (106 камер заповнено і закрито).

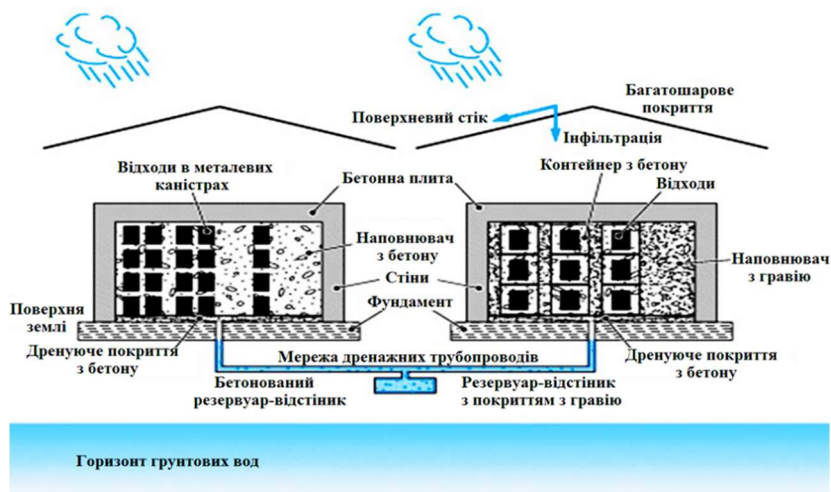


Рис. 9 – Принципова схема захоронення відходів у Центрі де л'Об.

США. На сьогоднішній день в країні діють чотири основних пункти захоронення (включно із сховищами) комерційних НАВ: Барнвелль, Річленд, Клайв та Техас [19]. Прикладами простих приповерхневих сховищ є сховища у Барнвеллі і Річленді. Вибір майданчиків був зумовлений або наявністю шару глини з низькою водопроникністю та / або розташуванням у місцевості з дуже низьким рівнем атмосферних опадів. Система захоронення складається з траншей, дно яких присипане піском для полегшення стоку води, яка просочується всередину сховища та далі в дренажну канаву. Ємності з відходами розміщують на дні траншеї одна на одній. Відходи з вищим рівнем радіоактивності заливають бетоном, бітумом або іншими матеріалами з низьким рівнем вилуговування або надійно ізолюють в контейнерах. Заповнені відходами траншеї засипають піском і глиною. Сховище засипане шаром ґрунту і має трав'яний покрив.

В 2014 р. було повідомлено про будівництво на території Національної лабораторії Айдахо приповерхневого сховища (на глибині  $\sim 8$  м) для захоронення НАВ (рис. 10). У сховищі планується захоронувати НАВ, які потребують дистанційного управління із застосуванням спеціальних засобів захисту. Частина сховища складатиметься з бетонних циліндрів блоково-збірного типу різної висоти та діаметра, встановлених вертикально. Кожен такий циліндр встановлено на основу з бетону та закритий бетонною кришкою, яка виконує роль радіаційного захисту та перешкоджає проникненню води всередину сховища. Сховище складатиметься з 225 бетонних камер. Передбачається, що кількість камер захоронення пізніше буде збільшена до 400.

### Висновки

1. В країнах, які експлуатують ядерні установки і розвивають ядерні технології, відсутній єдиний підхід до захоронення низько- і середньоактивних відходів з короткоіснуючими радіонуклідами.

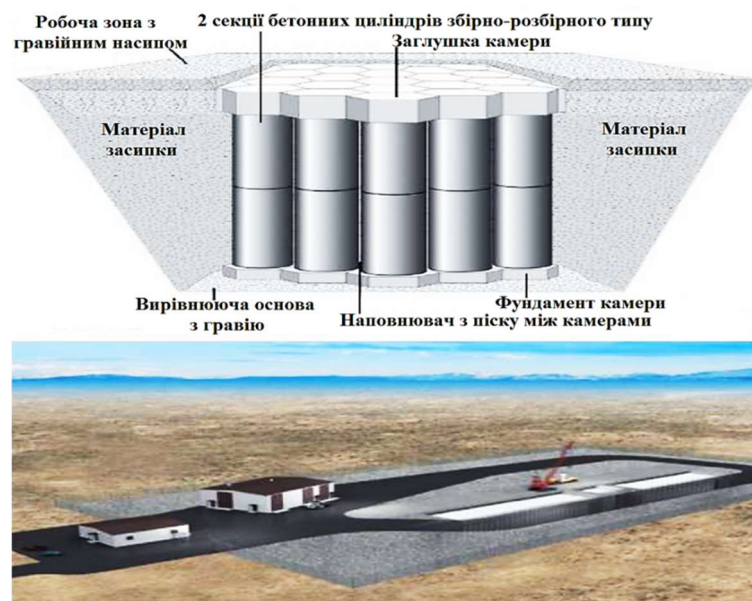
2. Тип сховища і його конструкційно-технологічні рішення визначаються специфікою самих відходів, характером майданчика, державною стратегією в цій сфері, а також соціальними й економічними факторами.

3. На сьогодні існують кілька типів сховищ для захоронення низько- і середньоактивних відходів з короткоіснуючими радіонуклідами:

- відносно прості приповерхневі сховища траншейного типу, наприклад, сховища Барнвелл і Річленд (США), Сантр-де-Ла-Манш (Франція), Чак Ривер (Канада);

- приповерхневі сховища модульного типу з ускладненою, порівняно з траншейним типом, системою інженерних бар'єрів і вимогами щодо вибору вміщуючих порід для майданчиків, які відіграють роль природних бар'єрів, наприклад, сховища Дрігт (Велика Британія), Ель-Кабриль (Іспанія), Дессель (Бельгія), Центр де л'Об (Франція), Айдахо (США);

- геологічні сховища, які, переважно, будують в гірничих виробках із складною системою тунелів і бар'єрного захисту, наприклад, Конрад, Морслебен, Ассе II (Німеччина), Лавійсса, Олкілуото, СФР (Швеція), Брюс (Канада).



**Рис. 10 – Проект пункту захоронення НАВ в Айдахо**

4. Глини переважно бентонітового типу широко застосовуються у складі різних елементів інженерних бар'єрів як приповерхневих сховищ (у найпростішому випадку бентонітовий шар забезпечував зменшення фільтрації і збільшення сорбції радіонуклідів і компонентів відходів матеріалами основи сховищ у разі відсутності природних глин), так і геологічних (для зменшення фільтрації води до сховища, збільшення сорбції радіонуклідів, запобігання руйнуванню бетонних конструкцій при зсувах вміщуючи порід), а також для зменшення виносу радіонуклідів із сховищ у навколишнє середовище у випадку руйнування цементно-бетонних компонентів інженерних бар'єрів.

#### **Список використаної літератури**

1. Закон України «Про внесення змін до деяких Законів України щодо вдосконалення законодавства в сфері поводження з радіоактивними відходами» № 208-IX від 17 жовтня, 2019 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/208-20#Text> (дата звернення 23.07.2021).
2. Норми радіаційної безпеки України, доповнення: Радіаційний захист від джерел потенційного опромінення (НРБУ-97/Д-2000). Державні гігієнічні нормативи: ДГН 6.6.1-6.5.061-2000. Офіц. вид. Київ, 2000. 80 с.
3. Державні санітарні правила 6.177-2005-09-02: Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України (ОСПУ-2005): Затвердж. Наказом МОЗ України № 54 від 02.02.05. Офіц. Вісник України. 24.06.2005. № 23. 197 с.
4. Внесення змін до Закону України «Про поводження з РАВ» (та в нормативні документи: ОСПУ-2005 і НРБУ-97/Д-2000).
5. Проскура Н.И., Шестопалов В.М., Зинкевич Л.И., Шибецкий Ю.А., Алексеева З.М., Жебровская Е.И. Оценка эффективности внедрения в Украине новой схемы классификации радиоактивных отходов. Ядерная та радіаційна безпека 1(65). 2015. С. 34-40.
6. IAEA. (2012). The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste (SSG-23). <https://www.iaea.org/publications/8790/the-safety-case-and-safety-assessment-for-the-disposal-of-radioactive-waste>.
7. Radioactive Waste Management Stakeholders Map in the European Union European Commission Joint Research Centre. Institute for Energy and Transport. 2014. 52 p.
8. Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности. Терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты. Вена :МАГАТЭ, 2008. 303 с.
9. Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards Series No. SSR-5. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2011. 104 p.
10. Status and trends in spent fuel and radioactive waste management. IAEA nuclear energy series No. NW-T-1.14. Vienna, 2018. 74 p.

11. Sweden's seventh national report under the Joint Convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management. 2020. 172 p. Available at: <https://www.regeringen.se/rattsliga-dokument/departementsserien-och-promemorior/2020/10/ds-202021/>
12. National Report of the Kingdom of Belgium for the Seventh meeting of the Contracting Parties to the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. 2020. 144 p. Available at: <https://fanc.fgov.be/en/system/files/jc-rapport-be-2020-public.pdf>
13. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management Report of the Federal Republic of Germany for the Seventh Review Meeting. Report prepared by Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMU), 2020. 339 p. Available at: [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Nukleare\\_Sicherheit/jc\\_7\\_bericht\\_deutschland\\_en\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nukleare_Sicherheit/jc_7_bericht_deutschland_en_bf.pdf)
14. The United Kingdom's seventh national report on compliance with the obligations of the Joint Convention on the safety of spent fuel management and the safety of radioactive waste management. 2020. 211 p. Available at: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/1006999/The\\_United\\_Kingdom\\_s\\_Seventh\\_National\\_Report\\_on\\_Compliance\\_with\\_the\\_Obligations\\_of\\_the\\_Joint\\_Convention.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1006999/The_United_Kingdom_s_Seventh_National_Report_on_Compliance_with_the_Obligations_of_the_Joint_Convention.pdf)
15. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management Seventh Spanish National Report. 2020. 266 p. Available at: [https://www.iaea.org/sites/default/files/spain-7rm\\_english.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/spain-7rm_english.pdf)
16. Canadian National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Seventh National Report. 2020. 318 p. Available at: [https://publications.gc.ca/collections/collection\\_2021/ccsn-cnsc/CC172-23-2020-eng.pdf](https://publications.gc.ca/collections/collection_2021/ccsn-cnsc/CC172-23-2020-eng.pdf)
17. Canadian Nuclear Laboratories Chalk River Laboratories Commission Public Hearing. 2022. 590 p.
18. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management: 7<sup>th</sup> Finnish National Report as referred to in Article 32 of the Convention. STUK report STUK-B 218. 2020. 157 p. Available at: <https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/140601/stuk-b259.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
19. Seventh National Report on Compliance the Joint Convention Obligations. Prepared by the French Nuclear Safety Authority (L'Autorité de sûreté nucléaire). 2020. 328 p. Available at: <https://www.french-nuclear-safety.fr/asn-informs/news-releases/france-submits-its-7th-report-to-the-iaea-on-the-implementation-of-the-joint-convention>
20. U.S. National Report for the Seventh Review Meeting of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management // U.S. Department of Energy, 2020. 236 p. Available at: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/10/f80/7th-JC-RM-United-States-NR-Final-Oct-2020.pdf>

---

**Boris Shabalín, Olena Lavrynenko, Natalia Mitsiuk**

#### **DISPOSAL OF SHORT-LIVED LOW- AND INTERMEDIATE-LEVEL WASTE: ANALYSIS OF FOREIGN EXPERIENCE**

*The article summarizes and analyzes the main approaches and practical experience of foreign countries regarding the disposal of short-lived low- and medium-level waste. Their place in the category of low-level waste according to the recommended classification of the IAEA, for which disposal in near-surface storage facilities is provided, is shown. Currently, in countries that operate nuclear facilities and develop nuclear technologies, there is no one approach to the disposal of such waste. The type of repository and its structural and technological solutions are determined by the specifics of the waste itself, the nature of the site, the state strategy in the nuclear industry, as well as social and economic factors. To date, several types of storage facilities have been developed for the disposal of short-lived low- and medium-level waste: relatively simple trench-type near-surface storage facilities; modular-type near-surface storage facilities with a complicated system of engineering barriers and criteria for selecting containing rocks (natural barriers) compared to the trench type; geological storages, which are mainly built in mining operations with a complex system of tunnels and barrier protection. Bentonite clays are widely used as components of engineering barriers. In the simplest case of near-surface repositories, the bentonite layer serves as the base material of the repositories and helps to reduce filtration and increase the sorption of radionuclides and other components. In the organization of geological repositories, the bentonite layer contributes to the reduction of water filtration into the repositories, increases the sorption of radionuclides, prevents the destruction of concrete structures during a shift by containing rocks, and, in the event of the destruction of cement-concrete structures of engineering barriers, leads to a decrease in the removal of radionuclides from the repositories into the environment. The work gives examples of different types of storage facilities in countries around the world.*

**Keywords:** *short-lived low- and intermediate-level waste, near-surface storage facilities, geological repositories, bentonite layer*

### References

1. Zakon Ukrainy «Pro vnesennia zmin do deiakyykh zakoniv Ukrainy shchodo vdoskonalennia zakonodavstva u sferi povodzhennia z radioaktyvnymy vidkhodamy» N 208-IX of October 17, 2019. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/208-20#Text> (date of application 23.07.2021).
2. Normy radiatsiynoi bezpeky Ukrainy, dopovnennia : Radiatsiynyi zakhyt vid dzherel potentsiynoho oprominennia (NRBU-97/D-2000). Derzhavni hiihyenichni normatyvy: DGN 6.6.1-6.5.061-2000(2000), 80 p.
3. Derzhavni sanitarni pravyla 6.177-2005-09-02. Ofic. Visnyk Ukrainy (2005), 23, 197 p.
4. Vnesennia zmin do Zakonu Ukrainy «Pro povodzhennia z RAV» ta v normatyvni dokumenty: OSPU-2005 i NRBU-97/D-2000).
5. Proskura N.Y., Shestopalov V.M., Zynkevych L.Y., Shybetskyi Yu.A., Alekseeva Z.M., Zhebrovskaia E.Y.. Otsenka efektyvnosti vnedrennia v Ukraine novoi skhemy klasyfykatsyy radioaktyvnykh otkhodov. Yaderna ta radiatsiina bezpeka 1(65). 2015. S. 34-40.
6. IAEA. (2012). The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste (SSG-23). <https://www.iaea.org/publications/8790/the-safety-case-and-safety-assessment-for-the-disposal-of-radioactive-waste>.
7. Radioactive Waste Management Stakeholders Mapin the European Union European Commission Joint Research Centre. Institute for Energy and Transport. 2014. 52 p.
8. Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности. Терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты. Вена :МАГАТЭ, 2008. 303 с.
9. Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standarts Series No. SSR-5. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2011. 104 p.
10. Status and trends in spent fuel and radioactive waste management. IAEA nuclearenergyseriesNo. NW-T-1.14. Vienna, 2018. 74 p.
11. Sweden's seventh national report under the Joint Convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management. 2020. 172 p. Available at: <https://www.regeringen.se/rattsligadokument/departementsserien-och-promemorior/2020/10/ds-202021/>
12. National Report of the Kingdom of Belgium for the Seventh meeting of the Contracting Parties to the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. 2020. 144 p. Available at: <https://fanc.fgov.be/en/system/files/jc-rapport-be-2020-public.pdf>
13. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management Report of the Federal Republic of Germany for the Seventh Review Meeting. Report prepared by Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMU), 2020. 339 p. Available at: [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Nukleare\\_Sicherheit/jc\\_7\\_bericht\\_deutschland\\_en\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nukleare_Sicherheit/jc_7_bericht_deutschland_en_bf.pdf)
14. The United Kingdom's seventh national report on compliance with the obligations of the Joint Convention on the safety of spent fuel management and the safety of radioactive waste management. 2020. 211 p. Available at: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/1006999/The\\_United\\_Kingdom\\_s\\_Seventh\\_National\\_Report\\_on\\_Compliance\\_with\\_the\\_Obligations\\_of\\_the\\_Joint\\_Convention.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1006999/The_United_Kingdom_s_Seventh_National_Report_on_Compliance_with_the_Obligations_of_the_Joint_Convention.pdf)
15. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management Seventh Spanish National Report. 2020. 266 p. Available at: [https://www.iaea.org/sites/default/files/spain-7rm\\_english.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/spain-7rm_english.pdf)
16. Canadian National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Seventh National Report. 2020. 318 p. Available at: [https://publications.gc.ca/collections/collection\\_2021/ccsn-cnsc/CC172-23-2020-eng.pdf](https://publications.gc.ca/collections/collection_2021/ccsn-cnsc/CC172-23-2020-eng.pdf)
17. Canadian Nuclear Laboratories Chalk River Laboratories Commission Public Hearing. 2022. 590 p.
18. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management: 7<sup>th</sup> Finnish National Report as referred to in Article 32 of the Convention. STUK report STUK-B 218. 2020. 157 p. Available at: <https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/140601/stuk-b259.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
19. Seventh National Report on Compliance the Joint Convention Obligations. Prepared by the French Nuclear Safety Authority (L'Autorité de sûreté nucléaire). 2020. 328 p. Available at: <https://www.french-nuclear-safety.fr/asn-informs/news-releases/france-submits-its-7th-report-to-the-iaea-on-the-implementation-of-the-joint-convention>
20. U.S. National Report for the Seventh Review Meeting of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management // U.S. Department of Energy, 2020. 236 p. Available at: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/10/f80/7th-JC-RM-United-States-NR-Final-Oct-2020.pdf>