

УДК 621.039.74

**Корчагін П.О.<sup>1</sup>, Шабалін Б.Г.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ПАО «Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Енергопроект»,

<sup>2</sup>ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»

## **ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ДОВІРИ СУСПІЛЬСТВА ДО БЕЗПЕКИ ГЕОЛОГІЧНОГО ЗАХОРОНЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ**

«Остаточне вирішення проблем поводження з відпрацьованим ядерним паливом і радіоактивними відходами в Україні спроможне вирішити тільки геологічне сховище»

*Академік Емлен Соботович*

*«Урядовий кур'єр» 09. 04. 2006, Відвертий діалог*

### **Вступ**

Вітаючи розширення використання відновлюваних джерел енергії, сподіваючись на підвищення ефективності використання енергії та прогрес в енергозбереженні важко уявити, що можна забезпечити зростання виробництва електроенергії та зменшення викидів CO<sub>2</sub> без збереження провідної ролі ядерної енергетики.

Очікується, що світове споживання електроенергії істотно зросте в найближчі десятиріччя, особливо в країнах, що розвиваються, супроводжуючи економічне зростання та соціальний прогрес [1]. Проте перспективи розвитку ядерної енергетики обмежуються через наявність цілого ряду невирішених проблем:

– забезпечення безпеки, захисту довкілля та впливу на здоров'я населення, з урахуванням подій на АЕС Три Майл Айленд, Чорнобильській АЕС, АЕС Фукусіма-1 та аварійних ситуацій на заводах ядерно-паливного циклу в США, Росії<sup>2</sup> та Японії. Існує також зростаюче занепокоєння з приводу безпеки при транспортуванні ядерних матеріалів та фізичного захисту ядерних об'єктів від терористичних атак;

– ядерна енергетика тягне за собою потенційну загрозу безпеці, зокрема, неправомірне використання енергетичних або інших ядерних об'єктів, операції з придбанням технологій або матеріалів з метою володіння ядерною зброєю. Ядерно-паливний цикл, який пов'язаний з технологіями розділення та збагачення плутонію і урану при переробці відпрацьованого палива (ВЯП) викликає особливу стурбованість;

– забезпечення безпеки при тривалому зберіганні та захороненні радіоактивних відходів (РАВ).

Захоронення РАВ ядерно-паливного циклу в даний час є однією з найскладніших проблем атомної енергетики. Сьогодні, після більш ніж сімдесяти років введення в експлуатацію першого ядерного реактора (уран-графітовий реактор на теплових нейтронах був створений в 1942 р. в США під керівництвом Е.Фермі) жодній країні ще не вдалося успішно захоронювати довгоіснуючі та високоактивні відходи, що утворюються в ядерній промисловості.

Концепція глибинного геологічного захоронення РАВ досліджувалася протягом декількох десятиліть і має високий рівень довіри серед експертів науково-технічного співтовариства. Існує впевненість, що цей підхід здатний безпечно ізолювати відходи від

<sup>2</sup> На підприємствах ядерно-паливного циклу РФ лише з 1953 по 2000 роки відбулося 13 ядерних аварій, в т.ч. з виникненням самопідтримуючої ланцюгової ядерної реакції (інколи тривалістю 10 та більше годин).

біосфери до тих пір, поки вони створюють значні ризики. Глибоке геологічне захоронення технічно можливе і не представляє особливих проблем з інженерної точки зору [2]. Ця впевненість базується на:

- розумінні процесів та подій, які пов'язані з міграцією радіонуклідів зі сховища до біосфери;
- математичних моделях, які при поєднанні з існуючою інформацією щодо конкретного майданчика та проекту сховища, дозволяють кількісно оцінити довгостроковий вплив сховища на навколишнє природне середовище;
- вивченні природних аналогів вмісних порід сховища, які надають докази того, що ключові процеси при моделюванні геологічних систем протягом тривалого періоду часу враховані та будуть сприяти зміцненню довіри.

Національною академією наук США, проголошено: «Тільки геологічне захоронення залишається науково і технічно надійним довгостроковим рішенням, що задовольняє необхідному рівню безпеки і не залежить від активного управління ... добре спроектоване сховище після закриття являє собою пасивну систему, що містить послідовні надійні бар'єри безпеки. Ми здатні проектувати, будувати і використовувати технологічні об'єкти з набагато більшою складністю і вищим потенціалом небезпеки» [3].

Більшість країн, що мають ядерні енергетичні програми, визначили пріоритетним технічним підходом остаточне захоронення високоактивних відходів в шахтних спорудах («геологічних сховищах») на глибинах понад сотні метрів. Проте, у багатьох країнах громадськість і політики заперечують проти створення сховищ для ядерних відходів і інтенсивного транспортування їх автомобільним або залізничним транспортом. Багато людей вважають, що нові ядерні електростанції не повинні будуватися до вирішення проблем з відходами. В деяких країнах були прийняті закони, спрямовані на уповільнення або навіть припинення ліцензування нових АЕС через відсутність очевидного прогресу відносно захоронення відходів.

Хоча геологічне захоронення проголошено технічною стратегією практично в кожній країні, є істотні відмінності у тому, як країни планують її реалізовувати.

США, Канада та Фінляндія відносяться до країн, які планують безпосередньо захоронювати ВЯП. Друга група країн – Великобританія та Франція, планують здійснювати переробку ВЯП і проводити захоронення осклованих ВАВ після переробки ВЯП. Третя група країн, в тому числі й Україна, передбачають тимчасове зберігання ВЯП у центральних поверхневих (приповерхневих) сховищах, а також є прихильниками відкладення рішення про його переробку на більш пізній термін. Деякі країни, зокрема, Японія і Росія – оголосили про заборону прямого захоронення ВЯП.

В Україні високоактивні та довгоіснуючі РАВ дозволяється захоронювати лише (виключно) у глибоких геологічних формаціях [4]. З прийняттям Закону України «Про поводження з радіоактивними відходами» ВЯП законодавчо було визнано не відходами, а цінною сировиною, яка підлягає зберіганню (ст.17). Після ратифікації Об'єднаної конвенції про безпеку поводження з ядерним паливом та безпеку поводження з радіоактивними відходами [5] Україна набула право самостійно визнавати ВЯП відходами і, відповідно, направляти таке паливо або деякі його партії на захоронення, як радіоактивні відходи (ст.10).

Метою захоронення у геологічних формаціях є безпечна ізоляція РАВ від біосфери протягом такого часу, доки зберігається потенційна небезпека від них. У більшості країн довготривала безпека розраховується на період не менше 100 тисяч років. По можливості, ізолюючі властивості бар'єрів захоронення мають бути передбачені на термін ізоляції до одного мільйона років.

Захист нинішнього і майбутніх поколінь є фундаментальною етичною вимогою. Цей захист має найвищий пріоритет, тому що при неможливості забезпечити достатній рівень безпеки усі інші аспекти стають вкрай незначними.

Сховище для ізоляції РАВ необхідно розмістити в такому геологічному оточенні, яке зберігає свої ізолюючі властивості протягом необхідного періоду часу і ефективно перешкоджає міграції радіонуклідів в біосферу. Іншими словами, надійність ізоляції РАВ

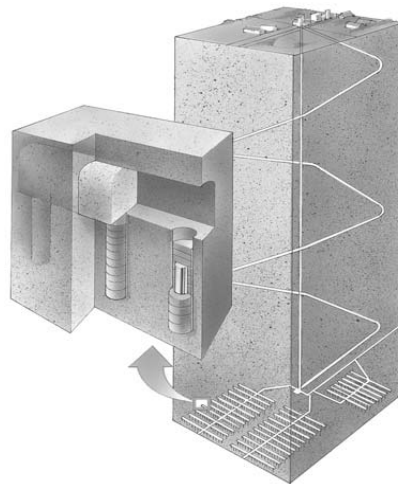
забезпечується шляхом створення багатобар'єрної системи природних та інженерних бар'єрів, де природні бар'єри з часом набувають вирішального значення. Активний адміністративний контроль (підтримка цілісності бар'єрів сховища, моніторинг, нагляд) має здійснюватися лише на стадії експлуатації сховища. Після закриття сховища безпека системи захоронення визначається реалізованими проектними рішеннями, бар'єрними властивостями геологічного середовища і пасивним адміністративним контролем (обмеженням певних видів людської діяльності в районі розташування сховища).

Багатобар'єрний принцип застосовується в усьому світі для гарантування довгострокової безпеки захоронення РАВ. Метою використання декількох бар'єрів є ефективно перешкоджання виносу забруднення протягом необхідного періоду ізоляції, при якому характеристики бар'єрів базуються на їх ефективності як цілої системи. При цьому, окремі складові частини системи мають бути взаємопов'язані і доповнювати один одного щодо їхньої ефективності.

Це відноситься до двох основних груп – геологічних і штучних технічних бар'єрів. Ефективність технічних бар'єрів, яка залежить від часу, в основному обумовлюється геологічними умовами, і навпаки, застосування технічних бар'єрів підсилює кондиції геологічних умов. Прикладом цього є захоронення ВЯП в кристалічних формаціях. Тут дуже дорогі технічні бар'єри, наприклад, контейнери з міді та бентонітовий заповнювач, компенсують недоліки скальних порід, які частково пропускають воду. З іншого боку, функціональні характеристики і ефективність цих технічних бар'єрів вимагають геологічного оточення зі стабільними гідрогеохімічними умовами.

### ***Геологічні сховища Фінляндії та США***

Вибрана конструкція для фінського сховища, що розміщено в гранітному масиві Олкілуото підкреслює цей системний підхід. Фінський дизайн [6] базується на концепції KBS-3 і призначений для прямого захоронення відпрацьованих тепловиділяючих збірок в мідно-чавунних контейнерах, розміщених у вертикальних каналах в кристалічних породах, оточених високо ущільненою бентонітовою глиною, на глибині близько 500 метрів (рис. 1).

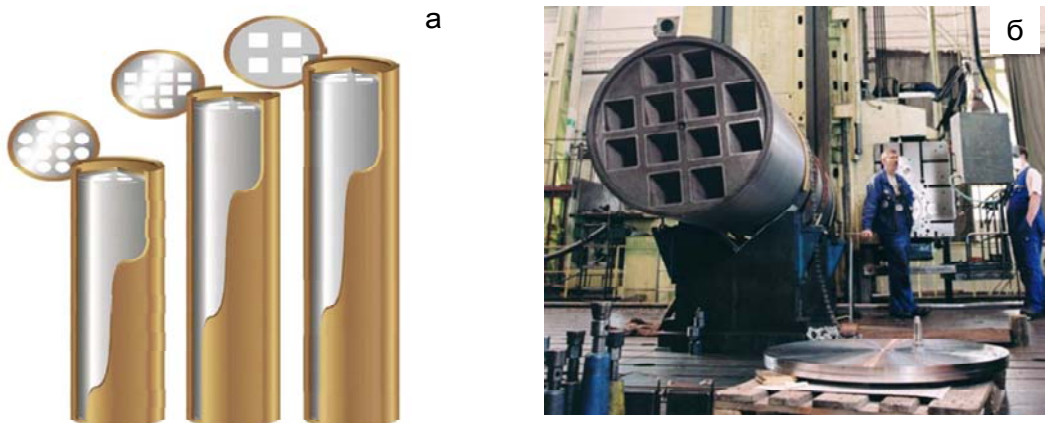


**Рис. 1.** Концепція сховища KBS-3, Фінляндія

Контейнер для захоронення ВАВ (ВЯП) представляє собою масивний мідний контейнер, у якому розміщується залізна каністра (рис. 2). Товщина міді складає 5 см. Мідний контейнер вважається основним бар'єром. Кількість відходів у кожному контейнері підібрана так, що температура на поверхні контейнера не перевищуватиме 100°C. (Максимальна температура досягається через 10-20 років після закриття сховища).

Очікується що, в умовах середовища вмісних порід Олкілуото, корозія міді буде відбуватися вкрай повільно, затримуючи вивільнення радіонуклідів з контейнерів на сотні тисяч років. Тампонаж з ущільненого бентоніту забезпечує низьку проникність, а сильно сорбуючий буферний шар – перешкоджає подальшому вивільненню більшості радіонуклідів у вмісні породи. Розміри бентонітових пор достатньо малі і ефективно блокують міграцію будь-яких колоїдів, що можуть утворюватися. Мінеральний склад бентонітового тампонажу підібраний з урахуванням швидкого встановлення відновлювальних умов в безпосередній близькості від контейнерів після їх розміщення у сховищі. Залізна каністра буде сприяти підтриманню відновлювального середовища всередині контейнера навіть тоді, коли ґрунтові води проникнуть скрізь шар міді. Вільний кисень може потрапити в ближню зону вмісних порід під час операцій з розміщення контейнерів у сховищі. Окиснення піриту, який додають до бентонітового тампонажу, допомагає поновити відновлювальне середовище навколо контейнера протягом декількох сотень років. За присутності кисню глибина корозії міді очікується не більш ніж на 3 мм за  $10^3 - 10^4$  років, що забезпечує утримання радіонуклідів впродовж  $10^5$  і навіть більше років. Швидкість корозії міді у відновлювальних умовах набагато повільніша, ніж за окисних умов [7].

Основною функцією вмісних гранітних порід у такій конструкції сховища є забезпечення стабільності фізико-хімічних умов і підвищення тим самим ролі міді та бентоніту у якості інженерних бар'єрів.



**Рис. 2.** Мідні каністри для захоронення відпрацьованого ядерного палива (Фінляндія). (а) – три типи каністр для трьох різних типів палива, (б) – типова залізна вставка з залізною кришкою

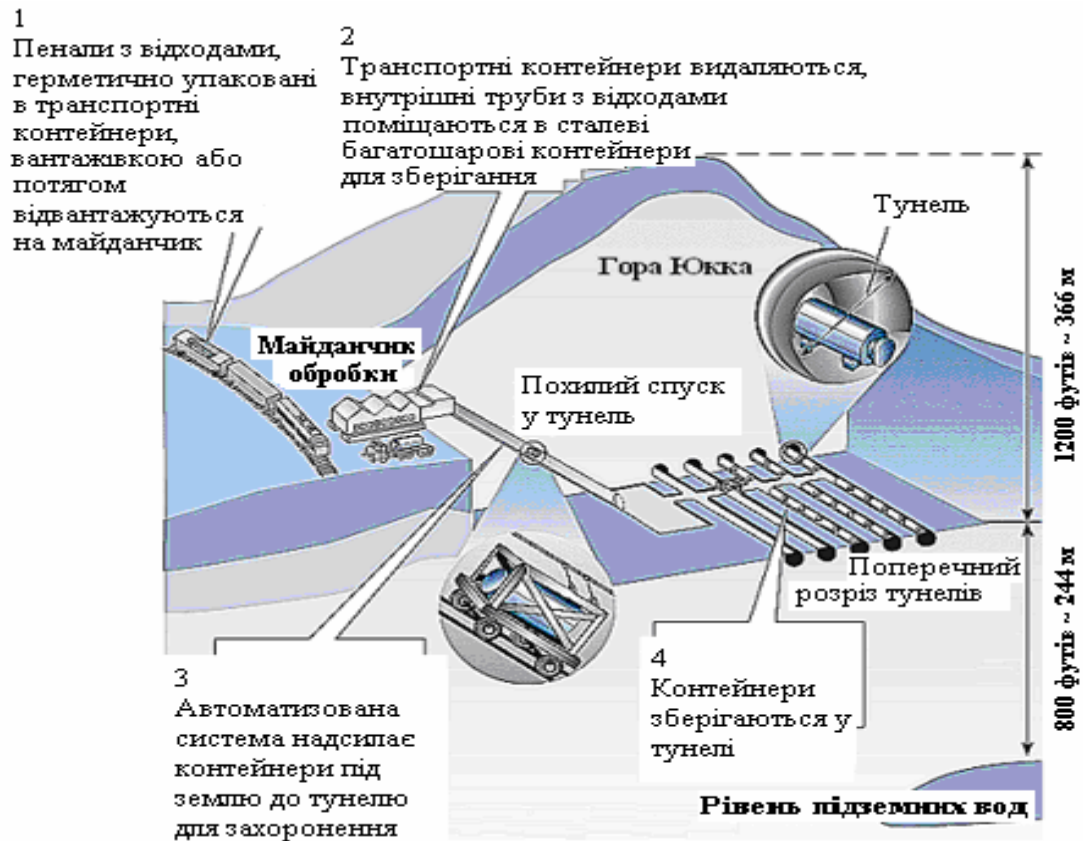
Усі процеси, які можуть призвести до вивільнення радіонуклідів з ближньої до дальньої зони сховища (корозія міді, розчинення форми відходів, проникнення радіонуклідів крізь бентоніт і т. ін.) добре зрозумілі для очікуваних умов сховища і це розуміння підкріплюється дослідженнями природних аналогів. Це, в свою чергу, дозволяє розробити надійні прогностичні моделі, які описують здатність системи інженерних бар'єрів до безпечної ізоляції РАВ.

Сховище шахтного типу в Юкка-Маунтін у Неваді [8] розраховане на розміщення для захоронення ВЯП та інших високоактивних РАВ загальною кількістю 75000 т. На відміну від інших сучасних концепцій сховище знаходиться вище рівня ґрунтових вод в ненасиченій зоні – тобто, пори і тріщини в кристалічних породах лише частково заповнені водою. Наявність бульбашок повітря в порах і тріщинах порід і проходження повітря через розломи системи буде

підтримувати окиснене середовище навколо упаковок з відходами. Основа конструкції сховища Юкка-Маунтін, покладалася на застосування більшої кількості інженерно-технічних бар'єрів для загального утримання радіонуклідів. Проектом

передбачено, що упаковки з відходами (рис. 3), у вигляді циліндричних каністр із нержавіючої сталі 5 метрів у довжину, кожна з яких містить 20-40 збірок ВЯП, будуть розміщені в оболонці товщиною 2 см з корозійностійкого сплаву на основі нікелю і захищені «крапельним щитом» товщиною 1,5 см з корозійностійкого титану.

Воду необхідно не допускати до контейнерів через те, що температура на поверхні контейнерів буде перевищувати 100 °С протягом перших 1000 років. Інші інженерні бар'єри системи захоронення спрямовані на створення зон з ненасиченими умовами шляхом відведення потоку підземних вод від відходів, або на контролюванні хімічного складу води в безпосередній близькості до відходів.



**Рис. 3.** Схема геологічного сховища Юкка Маунтін, США

Можна очікувати, що досвід роботи з повномасштабними сховищами Юкка-Маунтін і Олкілуото значно вплине на ставлення громадськості до можливості захоронення високоактивних РАВ та ВЯП. Досвід введення в експлуатацію та експлуатація цих сховищ або, що менш бажано, серія незапланованих подій буде мати важливе значення не тільки для самих об'єктів, але й впливати на громадську думку щодо майбутніх зусиль по захороненню РАВ в інших місцях.

### ***Проблеми щодо розповсюдження ядерних матеріалів, ядерних технологій та ядерної зброї***

Значний розвиток ядерної енергетики в світі може призвести до втрати або зниження ефективності контролю за нерозповсюдженням ядерних матеріалів, ядерних технологій та ядерної зброї. Ядерна енергетика не повинна розширюватися, поки ризик розповсюдження ядерних матеріалів та ядерних технологій з підприємств ядерно-паливного

циклу не буде контрольованим та прийнятно низьким. Існують, принаймні, три проблеми, що викликають особливу занепокоєність:

- накопичені на даний час запаси плутонію, які безпосередньо можуть використовуватися для створення зброї масового знищення;
- ядерні об'єкти з неадекватним контролем і умовами зберігання, наприклад у РФ<sup>3</sup>;
- передавання технологій, особливо що стосуються збагачення і радіохімічної переробки, які дають можливість деяким країнам використати їх для розробки ядерної зброї.

Існує ймовірність того, що країни які бажають придбати або розвивати ядерну зброю будуть використовувати можливості АЕС для володіння повним ядерно-паливним циклом, включаючи збагачення, виготовлення та переробку ядерного палива. Ключовим кроком для створення ядерної зброї є можливість придбання достатньої кількості подільних матеріалів: високозбагаченого урану чи плутонію. Відпрацьоване ядерне паливо з реакторів по всьому світі містить понад 1000 т плутонію, а в результаті переробки ВЯП на підприємствах ядерно-паливного циклу у Великобританії, Франції, Росії та Японії накопичено близько 200 т плутонію [1]. Відповідні ризики підвищеної тривоги у зв'язку з подіями 9 вересня 2001 р. продемонстрували можливості міжнародного тероризму.

Розрізняють два типи плутонію: військовий (кондиційний), що напрацьовується в реакторах-розмножувачах та «цивільний» (сильно забруднений), який вилучають з ВЯП енергетичних реакторів. Після демонтажу боєголовки буде вивільнено сотні тонн високозбагаченого урану та десятки тонн плутонію. Станом на 2000 р. кількість високозбагаченого урану в РФ оцінювалася в 900 т, кондиційного плутонію – 140-160 т, а енергетичного плутонію – 30 т. Сюди не включено плутоній, який може бути виділений з ВЯП реакторів АЕС, транспортних ядерних установок, а також промислових реакторів [9].

Свого часу в СРСР було створено масштабне промислове виробництво збройового урану і плутонію. Було побудовано 13 військово-промислових реакторів з графітовим уповільнювачем нейтронів і водним охолодженням. У теперішній час, згідно з міжурядовою угодою між США та РФ (2002 р), припинено експлуатацію майже усіх російських та усіх американських реакторів для напрацювання збройового плутонію. Працюють лише три уран-графітові реактори типу РБМК: АДЕ-4, АДЕ-5 (м. Северськ, Томська обл.) та АДЕ-2 (м. Железногорськ, Красноярський край). Це обумовлене тим, що окрім плутонію (1200 кг кондиційного плутонію в рік), вони виробляють ще і тепло- та електроенергію для населення цих міст (приблизно 215 тис. осіб) [9].

### ***Збільшення часу тимчасового зберігання ВЯП***

Навіть якщо ВЯП призначене для безпосереднього захоронення, воно все одно буде зберігатися у поверхневих (приповерхневих) сховищах протягом багатьох років через високу активність ( $10^{17}$ - $10^{18}$  Бк/т ВЯП), а також довготривалості процесу створення геологічного сховища. У зв'язку з високим енерговиділенням, ВЯП має зберігатися протягом не менше п'яти років у басейнах витримки АЕС перш ніж воно може бути відправлене на тривале зберігання або захоронення. Ще через 30 років тепло від розпаду продуктів поділу (в основному цезію-137 та стронцію-90), що будуть основними джерелами тепла за цей період, зменшиться приблизно у два рази, а через 100 років внесок від цих ізотопів у енерговиділення знизиться більше, ніж на 90 %. При цьому, випромінювання від продуктів поділу слугує значною перешкодою, яка ускладнює спроби потенційних шукачів ядерної зброї з виділення плутонію з ВЯП, що є бажаним з позиції нерозповсюдження. Цей факт є ще одним з аргументів на користь тривалого зберігання ВЯП у централізованому сховищі як в Україні, так і в інших країнах, де експлуатуються АЕС.

<sup>3</sup> В рамках Міжнародної технічної допомоги Росії згідно програми Глобального партнерства було проведено значні роботи з покращення умов зберігання ВЯП і активних зон реакторів атомних криголамів та атомних підводних човнів.

### *Рівень вигорання ядерного палива в енергетичних реакторах*

Вигорання ядерного палива це кількість енергії, яка була отримана з одиниці палива за час його знаходження в реакторі. Не так давно величина вигорання палива легководних реакторів в середньому складала близько 33 МВт·діб/кгU. Збільшення її до 100 МВт·діб/кгU і більше є технічно можливим.

Зупинки енергоблоків на ремонт, перевантаження палива, через диспетчерські обмеження та з інших причин призводять до зниження коефіцієнту використання встановленої потужності (КВВП) енергоблоків та погіршення економічної ефективності атомних станцій.

КВВП АЕС України за перші дев'ять місяців 2008 р. склав 74,1 %. Для порівняння КВВП російських АЕС досягає 81 %, а АЕС Фінляндії в 2008 р. – 95-96 %.

Збільшення вигорання палива до 100 МВт·діб/кгU призведе до триразового зменшення обсягу ВЯП при зберіганні, кондиціонуванні, транспортуванні та захороненні на одиницю виробленої електроенергії. Кількість плутонію та інших актинідів, які забезпечують домінуючий внесок в радіотоксичність ВЯП після перших ста років, буде також трохи менша на одиницю виробленої електроенергії. Ще одна перевага збільшення глибини вигорання полягає в тому, що ізотопний склад для вилучення плутонію зробить його менш придатним при використанні в ядерних вибухових пристроях. При зростанні вигорання доля Pu-239 знижується, а Pu-238 – збільшується. Наприклад, збільшення глибини вигорання палива РWR з 33 МВт·діб/кгU до 100 МВт·діб/кгU призведе до зниження вмісту Pu-239 з 65 % до 53 %, в той час як вміст Pu-238 збільшиться з 1 % до 7 % [10]. Наявність ізотопів Pu-238 особливо небажана в ядерних вибухових пристроях через відносно високу інтенсивність випромінювання нейтронів при спонтанному діленні і теплоту розпаду. Вміст Pu-238 більше 6 % робить плутоній непридатним для виготовлення зброї.

В останні роки середнє вигорання палива легководних реакторів (LWR) зросло з 33 МВт·діб./кгU до 45–50 МВт·діб./кгU. Оператори АЕС США пішли на цей крок з економічних причин, які значною мірою пов'язані з вартістю захоронення ВЯП. Впровадження на АЕС циклу з високим вигоранням ядерного палива дозволяє експлуатувати реактори протягом триваліших періодів між завантаженнями, збільшуючи тим самим КВВП.

### *Альтернативні технології захоронення РАВ у глибоких свердловинах*

Альтернативним підходом до створення геологічного сховища шахтного типу є розміщення контейнерів з РАВ в свердловинах, пробурених в стабільних кристалічних формаціях на декілька кілометрів в глибину. Контейнери, що містять ВЯП або високоактивні відходи будуть спущені в нижню частину свердловини, а верхня частина – кілька сотень метрів – буде заповнена герметизуючим матеріалом, таким як глина, асфальт або бетон. На глибинах у декілька кілометрів, великі розміри кристалічних масивів, як відомо, дуже стабільні, хоча підпадали під вплив тектонічних, вулканічних та сейсмічних процесів протягом мільярдів років.

Основні переваги концепції сховища у глибоких свердловинах по відношенню до шахтних включають наступне:

- набагато довші шляхи міграції від розміщених відходів до біосфери,
- низький вміст води, низька пористість та низька проникність кристалічних порід багатокілометрової глибини,
- як правило, дуже висока мінералізація підземних вод (через більш високу питому вагу, солоната вода не може конвективно піднятися до верхніх шарів прісної води, навіть якщо буде нагріватися)
- наявність потенційно придатних майданчиків.

Багато країн, які використовують або бажають використовувати ядерну енергію, мають сприятливі геологічні умови, що підходять для захоронення відходів у глибоких свердловинах. Можливе близьке розміщення майданчиків для свердловин до АЕС. Придатні породи для захоронення РАВ також є під морським дном. З цієї причини така концепція

може бути особливо цікавою для щільно населених країн, таких як Японія, Корея і Тайвань. Оскільки більша частина енергетичних реакторів в цих країнах (та й у більшості інших) знаходиться на або близько до берега, виникає можливість побудови штучних морських островів, які були б ідеальним місцем для буріння під морське дно і придатними для тимчасового зберігання ВЯП, при цьому виключається необхідність в наземному транспортуванні відходів до централізованих сховищ для тривалого зберігання.

Реалізація схеми глибокої свердловини буде вимагати розробки нового набору стандартів, норм та правил і, відповідно, часу та коштів. Головне питання полягає у можливості вилучення відходів із свердловин (хоча більша складність вилучення відходів з свердловини також може бути перевагою свердловинної схеми). Існуючі у США нормативні вимоги до шахтних сховищ вимагають періоду в декілька десятиліть, протягом якого високоактивні відходи можуть бути вилучені зі сховища. Для глибоких свердловин це буде важко і дорого, а, ймовірно, і практично неможливо. Крім того, на великих глибинах одержання інформації про умови *in situ* (наприклад, геохімічні дані, розподіл напружень, тріщинуватість, корозійні властивості підземних вод відносно різних матеріалів сховища і т.п.) ніколи не буде настільки всеосяжне, як у більш доступному для досліджень шахтних сховищ [12]. Відновлення при можливих аваріях, що можуть трапитись під час розміщення відходів (наприклад, застрягли контейнери або пошкоджено стінки свердловини) буде більш складним, ніж подібна подія у шахтному сховищі. Нарешті, незважаючи на збільшення майже на порядок глибини розміщення відходів, важко прогнозувати вплив на громадську думку стратегії розміщення в одному великому центральному сховищі чи в багатьох розкиданих свердловинах.

Разом з тим, підхід до захоронення у глибоких свердловинах є перспективним у розширенні практичних можливостей геологічного захоронення з більшою гнучкістю щодо розміщення і потенціалом для зниження і без того дуже низького ризику довгострокового опромінення, без істотних додаткових витрат.

Глибокі свердловини можна створювати на майданчиках або поблизу АЕС, тим самим зменшуючи необхідність транспортування ВЯП на великі відстані. Крім того, свердловини можуть бути об'єднані в одному місці. Наприклад, територія площею 4 км<sup>2</sup>, на якій розміщені свердловини, що приблизно дорівнює території сховища Юкка-Маунтін, здатне вмістити більше ВЯП, ніж передбачено проектом цього сховища.

### ***Захоронення рідких радіоактивних відходів***

Не зважаючи на те, що переважна кількість країн, в т.ч. Україна, практикує захоронення РАВ лише у твердому стані, в Росії продовжується практика закачування рідких радіоактивних відходів (в т.ч. високоактивних) під землю. Це відбувається на виробничих майданчиках Красноярська-26 (м. Железнодорожск), Томська-7 (м. Северськ) та в районі м. Мелекес (Димитровград) на полігоні Науково-дослідного інституту атомних реакторів.

Згідно існуючої практики та відповідних дозволів РРВ, що містять також подільні ядерні матеріали, розміщують під землею у підкритичних концентраціях. На деяких полігонах закачування РРВ супроводжується відкачуванням пластових вод. Вважається, що таке захоронення не створює небезпеки для середовища проживання в майбутньому (приблизно 1000 років). Проте, підкритичний подільний матеріал при розміщенні під землею, внаслідок природних процесів, може досягнути критичності і сформувати автокаталітичні критичні конфігурації. За оцінками російських вчених при виникненні самопідтримуючої ланцюгової ядерної реакції (СЛЯР) енерговиділення може сягати декількох сотень ГДж (десятки і сотні тон тритилового еквіваленту) в одній події. При цьому нагадаємо, що критична маса плутонія-239 у вигляді розчинених у воді солей складає 0,5 кг, а деяких трансуранових елементів, що присутні у РАВ, вона суттєво нижча. За відсутності води необхідно 50-100 кг подільного матеріалу для досягнення автокаталітичної критичності, а за її наявності автокаталітична критичність може настати при кількостях близько 2 кг [9].



В більшості свердловин після закачування відходів спостерігається значне підвищення температури (до 160°C). Проблеми полігонів підземного захоронення РРВ пов'язані з протіканнями внаслідок корозійного або механічного пошкодження трубопроводів для перекачування радіоактивних розчинів на полігони, з розвитком СЛЯР, з аваріями у свердловинах та пластах (розрив труб, викид рідини зі свердловин), з газоутворенням і підвищенням тиску в пласті та свердловинах внаслідок життєдіяльності анаеробних бактерій та з викиду рідини зі свердловини внаслідок радіаційно-хімічного газовиділення у пласті, з перегрівом пласта внаслідок надмірного радіаційного навантаження, а також з непередбачуваним рухом радіоактивної рідини в пласті по розломам з наступним виносом до горизонтів, що сполучаються з поверхнею.

### ***Переробка відпрацьованого ядерного палива та виділення деяких радіонуклідів***

Відпрацьоване ядерне паливо, що вилучене з ядерного реактора буде залишатися високоактивним багато тисяч років. Основною технічною проблемою для довготривалої ізоляції ВЯП і ВАВ після переробки є дуже довготривала їхня токсичність. Проте і короткострокові ризики від поводження з ними також мають розглядатися. До остаточного розміщення відходів у сховищах для захоронення, вони будуть проходити ряд проміжних етапів і операцій, у тому числі кондиціонування, транспортування та тимчасове зберігання.

На сьогодні існує два варіанти вирішення проблем поводження з ВЯП:

- пряме захоронення ВЯП (у якості відходів) після тимчасового зберігання, достатнього для розпаду короткоіснуючих радіонуклідів;
- захоронення кондиціонованих ВАВ від переробки ВЯП після вилучення урану і плутонію, а також інших радіонуклідів.

При прийнятті рішення про переробку ВЯП необхідно враховувати такі економічні витрати, як вплив на безпеку і навколишнє природне середовище та ризики розповсюдження ядерних матеріалів [14]. Крім того, ця діяльність буде джерелом додаткових ризиків для персоналу та населення, а також утворення значних обсягів РАВ, що містять довго існуючі трансуранові радіонукліди. Тому значна частина цих відходів, в кінцевому рахунку, мають бути захоронені у геологічному сховищі. Вартість усієї схеми виділення деяких радіонуклідів в ВЯП значно перевищить вартість відкритого паливного циклу (пряме захоронення ВЯП).

Різні радіонукліди в різні періоди стають домінуючими вкладниками до загальної радіоактивності та енерговиділення ВЯП внаслідок радіоактивного розпаду.

Два продукти поділу – стронцій-90 та цезій-137, кожний з періодом напіврозпаду близько 30 років, дають основний внесок у загальну радіоактивність та залишкове тепловиділення ВЯП після вивантаження палива з реактору і наступні кілька сотень років. Після цього, домінуючими відносно тепловиділення та радіоактивності стають актиніди, окремі з них в різний період часу дають різний внесок активності.

Виділення (екстракція) радіонуклідів високо тепловипромінюючих продуктів поділу (так звана цезій-стронцієва фракція) з ВЯП та окреме кондиціонування і зберігання дозволить розмістити їх в більш компактному об'ємі в геологічному сховищі. Разом з тим, слід зазначити, що подібний результат може бути досягнутий і без переробки ВЯП – за рахунок зберігання ВЯП протягом декількох десятиліть, до розпаду продуктів поділу.

Оцінки майданчиків для сховищ Юкка-Маунтін та Олкілуото показують, що довгоіснуючі продукти поділу, такі як технецій-99 та йод-129, є найбільш важливими щодо ризику довгострокового опромінення, ніж більшість актинідів. В окислювальних умовах, характерних для сховища Юкка-Маунтін, домінуючий внесок до ризику довготривалого опромінення дають нептуній-237 та технецій-99. Протягом перших 70 000 років, провідний внесок складатиме технецій-99, а в період між 100 000 років та 1 млн. років – домінуючим є ізоотоп нептуній-237. Пік дози в 150 мбер/рік (приблизно половина фонові дози) буде досягнутий через 400 000 років [15].

З іншого боку, за проведеними оцінками для сховища Олкілуото, показано, що актиніди будуть дуже мало впливати на довгострокові дози опромінення, а домінуючий вклад буде забезпечувати декілька довгоіснуючих продуктів поділу. Прогнозований пік дози буде на три порядки нижче, ніж для сховища Юкка-Маунтін [6].

Інколи висловлюється думка, що переробка ВЯП і виділення радіонуклідів з метою зменшення радіотоксичності відходів, може змінити ставлення громадськості до можливості і прийнятності захоронення ядерних відходів. Проте нам невідомо жодного з доказів, які підтримують цю точку зору. Точка зору супротивників сховища для захоронення чи шляхів транспортування відходів суттєво не зміниться, навіть якщо період радіотоксичності зменшиться з сотень тисяч років до сотень років.

### **Висновки**

Ядерна енергетика є і залишається важливим джерелом енергозабезпечення в Україні на далеку перспективу.

Для зміцнення суспільної довіри в нашій країні до подальшого розвитку ядерної енергетики необхідно всебічно зменшувати ризик розповсюдження ядерної зброї, неконтрольованого використання ядерних матеріалів та ядерних технологій при транспортуванні, зберіганні та захороненні ВАВ та ВЯП.

Створення геологічного сховища РАВ в Україні дозволить забезпечити: сталий розвиток ядерної енергетики за рахунок зменшення експлуатаційних витрат на зберігання РАВ і ВЯП. Дозволить підвищити рівень національної безпеки – зменшення ризику терористичних актів, військових дій, зменшення соціальної-психологічної напруги в суспільстві, пов'язаних з поводженням з ВАВ. Завдяки геологічному сховищу буде гарантована ізоляція відходів від людини і біосфери на весь період потенційної небезпеки відходів; зменшення кількості місць тривалого зберігання РАВ, підвищення безпеки при експлуатації та знятті з експлуатації ядерних установок; прискорення робіт з перетворення об'єкта “Укриття” в екологічно-безпечну систему; завершення одного з основних напрямків ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС.

Настав час приступити до реалізації законодавчо визначених умов захоронення довгоіснуючих та високоактивних РАВ в геологічному сховищі. Необхідно розпочинати роботи з дослідження перспективних майданчиків для розміщення геологічного сховища, досліджень геологічних умов та проектування і тестування інженерних бар'єрів.

1. U.S.Department of Energy, Energy Information Administration (EIS) International Energy Outlook 2002.
2. International Atomic Energy Agency, “Scientific and Technical Basis for the Geologic Disposal of Radioactive Wastes”, Technical Report No. 413, IAEA, Vienna, 2003.).
3. National Academy of Sciences, Board on Radioactive Waste Management, Disposition of High Level Waste and Spent Nuclear Fuel: The Continuing Societal and Technical Challenges, National Academy Press, Washington, D.C., 2001.
4. Закон України «Про поводження з радіоактивними відходами», №255/95-ВР від 30.06.95.
5. Об'єднана конвенція про безпеку поводження з ядерним паливом та безпеку поводження з радіоактивними відходами, ратифікована Законом України в 2000 р.
6. *Vieno and Nordman*, “Safety Assessment of Spent Fuel Disposal in Hastholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara - TILA-99,” POSIVA 99-07, March 1999, ISBN 951-652-062-6).
7. Natural Analogues in Performance Assessment for the Disposal of long lived Radioactive Waste, Technical Reports Series N304, AEA, 1989.
8. U.S. Department of Energy, “Yucca Mountain Science and Engineering Report, Rev. 1”, DOE/RW-0539-1, February 2002.
9. *Крышев И.И., Рязанцев Е.П.* Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. М.: ИздАТ, 2000, 384 с.
10. *Zhiwen Xu, Ph.D.* Dissertation, Department of Nuclear Engineering, M.I.T., 2003.
11. *Зеленский В.Ф., Неклюдов И.М., Ожигов Л.С., Шляев Б.А., Хижняк Н.А., Мушников В.Н., Кузьменко В.А., Пасечник С.Г., Клюкович В.А.* Радиационная дезактивация долгоживущих радиоактивных отходов с помощью протонов средних энергий. Радиационное материаловедение. Труды Международной конференции по радиационному материаловедению, ХФТИ, 1990, Том 5, с.121-128.

12. *Tim Harrison*: "Very Deep Borehole: Deutag's Opinion on Boring, Canister Emplacement and Retrievalability", Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., R- 00- 35, May 2000.
13. Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС: учебное пособие для вузов / М.А. Скачек. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 448 с.: ил.
14. *B. Brogli and R. A. Krakowski*, Paul Scherrer Institut Nuclear Energy and Safety Research Department, PSI Bericht No. 02-14, August 2002.
15. Final Environmental Impact Statement for Yucca Mountain Repository, February 2002.

**Корчагин П. А., Шабалин Б. Г. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ДОВЕРИЯ ОБЩЕСТВА К БЕЗОПАСНОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

*Проанализированы пути повышения безопасности при длительном хранении и захоронении высокоактивных отходов, в том числе отработанного ядерного топлива, с точки зрения повышения доверия общества к дальнейшему использованию ядерной энергии и недопущению несанкционированного использования ядерных материалов и ядерных технологий.*

**Korchagin P. A., Shabalin B. G. WAYS TO INCREASE THE SOCIETY'S CONFIDENCE IN SAFETY OF A GEOLOGICAL RADIOACTIVE WASTE DEPOSITORY**

*The authors have analysed the ways of improving safety of long-term storage and disposal of high level waste including spent nuclear fuel from the viewpoint of increasing confidence of the society in further use of nuclear energy and preventing illegal use of nuclear materials and technologies.*