

## ВИВЧЕННЯ МІЖНАРОДНОГО ДОСВІДУ ВИКОРИСТАННЯ «СУХИХ» СХОВИЩ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА КОНТЕЙНЕРНОГО ТИПУ

Коньшин В.І., Вишневський П.Ф.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Був розглянутий міжнародний досвід «сухого» зберігання відпрацьованого ядерного палива. Стисло описані типи сховищ «сухого» зберігання. Наведені дані щодо використання сховищ контейнерного типу у різних країнах.

**Ключові слова:** відпрацьоване ядерне паливо, «сухе» зберігання, міжнародний досвід, типи сховищ, контейнерні сховища.

**Постановка проблеми.** Впродовж останнього десятиліття ХХ сторіччя спостерігався бурхливий розвиток технологій «сухого» зберігання відпрацьованого ядерного палива (ВЯП). В силу різних практичних та економічних причин різні способи «сухого» зберігання розвивалися перш за все з тим, щоб задовольнити специфічні вимоги різних видів ядерного палива. При цьому вирішувалися такі завдання як збільшення температури експлуатації, створення різних газових середовищ (повітря, гелій, вуглекислий газ). Спочатку сам процес «сухого» зберігання розглядався як основне завдання. Камери, комірочки залізобетонного масиву та не транспортовані контейнери були основними технологічними елементами «сухого» зберігання. Поступово прийшло усвідомлення, що контейнери для «капсулювання» ВЯП можуть виконувати різноманітні функції. У Німеччині, Бельгії та США були створені контейнери подвійного призначення, що можуть використовуватися як для зберігання ВЯП, так і для його транс-портування до сховища чи з нього без перевантаження палива. Деякі види контейнерів почали створювати одночасно як для транспортування, так і для остаточного захоронення. Важливим є вивчення набутого досвіду з огляду на широке поширення сховищ даного типу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналізом проблем «сухого» зберігання займаються науково-дослідні установи при експлуатуючих організаціях у країнах з високим рівнем проникнення атомної енергетики у промисловий комплекс. З огляду на спорудження сховища даного типу в Україні, накопичений на сьогодні досвід ставав об'єктом дослідження таких вітчизняних авторів, як Ключников А.А. та Пазухін Е.М., також закордонних авторів, посилання на праці яких наведені наприкінці статті.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Попри наявність значної кількості ґрунтовних праць на дану тему, вони весь час потребують актуалізації через постійне вдосконалення сховищ та розробку їх нових модифікацій. Тому виникає постійна необхідність виносити на розгляд наукової спільноти отримані в ході експлуатації результати.

**Мета статті.** Виходячи з теми дослідження, метою статті є вивчення міжнародного досвіду використання «сухих» сховищ та оприлюднення актуальних даних про стан та об'єми сховищ такого типу в різних країнах.

**Виклад основного матеріалу.** Розрізняють 3 типи сховищ «сухого» зберігання ВЯП: S-, V-, C-сховища.

S-системи (Silos, комірочки залізобетонного масиву) є модульними чи монолітними системами із залізобетону. Бетон забезпечує радіаційний захист, в той час як локалізація ВЯП забезпечується вбудованою металевією ємністю, що герметизується після завантаження ВЯП чи окремим металевим герме-

тичним контейнером. У такому сховищі ВЯП може зберігатися як у вертикальному, так і в горизонтальному положенні.

Типовим прикладом S-системи є контейнер АЕСЛ, що завантажується на майданчику для зберігання та містить внутрішнє сталеве облицювання. ВЯП передається у герметичних корзинах з використанням спеціального захисного контейнера для передачі та завантажується вертикально.

Система NUHOMS є прикладом горизонтальної S-системи. ВЯП завантажується вертикально до металевих контейнерів, що зберігаються горизонтально в модулях бетонної споруди. Спеціальний перевантажувальний контейнер використовується для завантаження герметичних металевих контейнерів та їх подальшого розміщення у горизонтальних бетонних комірках.

V-сховища (Vaults, камери) є бетонними спорудами (вище чи нижче рівня ґрунту), що містять систему порожнин (об'ємів), які підходять для зберігання окремих ТВЗ чи їх груп. Радіаційний захист забезпечується особливістю структури сховища. Тепловідвід забезпечує вимушена чи природна циркуляція повітря чи газу навколо модулів з ВЯП, після чого повітря виходить у атмосферу чи віддає тепло у другому контурі охолодження.

Типовими особливостями камер для «сухого» зберігання ВЯП є їх модульна структура, що дозволяє здійснювати їх розширення, розділяти функції зберігання та захисту, здійснювати моніторинг зберігання та застосовувати вертикальний спосіб завантаження ВЯП. Паливо надходить до V-сховища у перевантажувальних контейнерах, звідки воно вилучається та готується для зберігання, якщо це необхідно. Після цього воно розміщується у окремій трубі (окрема ТВЗ) чи у циліндрі зберігання (окремий чи багатоеlementний контейнер), що знаходиться в бетонній порожнині структури V-сховища. Труби та циліндри зберігання загерметизовані і можуть бути заповнені інертним газом для покращення процесу теплопередачі та запобігання окисленню ВЯП. Вони зазвичай під'єднані до системи постійного чи періодичного моніторингу.

Контейнери (Casks), згідно з правилами МАГАТЄ, призначені для транспортування, зберігання чи захоронення ВЯП. До контейнерів належать металеві контейнери, бетонні контейнери та S-контейнери. Існує велика кількість різноманітних видів контейнерів для ВЯП.

За своєю суттю контейнери є окремими модулями. Це герметичні системи, що під час зберігання не допускають виходу радіонуклідів. Контейнери забезпечують утримання ВЯП та захист від радіації з допомогою фізичних бар'єрів, що включають металеве чи бетонне тіло контейнера, а також металеві шари та кришки. Типова конфігурація контейнерів – циліндр. Паливо розміщується у «кошику» для зберігання, що може бути (чи не бути) частиною самого

контейнера. Тепловідвід забезпечується механізмом теплопровідності та природним розсіюванням тепла у навколишнє середовище. Контейнери можна розміщувати в будівлях чи на відкритій місцевості.

Сховище, що обслуговує систем контейнера, може включати обладнання, необхідне для поводження з контейнерами, завантаження палива, дезактивації, радіаційного захисту та моніторингу. Сховища контейнерів можуть бути незалежними чи використовувати обладнання для поводження з контейнерами, паливом та дезактивації, що належить ядерному реактору.

Металеві контейнери є масивними модулями, що використовуються для транспортування, зберігання та можливого захоронення ВЯП. Матеріалом у таких контейнерах є сталь різного типу, застосовується також шарова структура зі сталі та свинцю. Контейнер містить внутрішню корзину чи герметичний металевий «бідон», що забезпечує структурну міцність та підкритичність ВЯП. Металевий контейнер зазвичай закривається системою подвійних кришок, що загвинчуються та герметизуються і можуть контролюватися на втрату герметичності.

Металеві контейнери зазвичай надходять на майданчик для зберігання безпосередньо із зони завантаження паливом. Деякі металеві контейнери ліцензуються як для зберігання, так і для транспортування за межі майданчика. ВЯП розміщується у контейнерах вертикально, як і самі контейнери, що перебувають у вертикальній позиції.

Бетонні контейнери є мобільними модулями з однією порожниною для зберігання. Вони використовуються в основному для зберігання ВЯП, і в деяких випадках для його транспортування. Структурна міцність та радіаційний захист забезпечуються укріпленням звичайним чи високоміцним бетоном.

Бетонні контейнери можуть використовувати всередині для розміщення ВЯП герметичні металеві бідони. Металеві бідони можуть використати для охолодження природну конвекцію наявного повітря чи спеціальну систему подвійних кришок. Металеві бідони можуть заповнюватися ВЯП на спеціальному майданчику для заправки та після передаватися для розміщення в бетонних контейнерах. ВЯП може також безпосередньо завантажуватися у бетонні контейнери на заправочному майданчику. Деякі металеві бідони можуть бути ліцензовані для транспортування як частина транспортних упаковок.

Бетонні контейнери можуть також використати металеве облицювання у порожнині для зберігання ВЯП та систему герметизації з єдиною кришкою. Процес теплопередачі забезпечується теплопровідністю через усю структуру бетону. У цьому випадку, як правило, реалізуються більш жорсткі обмеження теплових режимів, ніж при системі теплопередачі, заснованій на конвективних потоках. ВЯП розміщується у бетонних контейнерах вертикально, і контейнери також зберігаються у вертикальному положенні.

Порівнюючи в цілому вимоги, висунуті в різних країнах до «сухих» сховищ, можна виділити кілька основних розділів. Це вимоги, висунуті до ВЯП та упаковки, що надходять на «сухе» зберігання; вимоги до умов (середовище, допустимі температури ВЯП та ін.) і тривалості «сухого зберігання»; вимоги із забезпечення ядерної безпеки в процесі зберігання; вимоги до обладнання та будівельних конструкцій «сухих сховищ та ряд інших. Формулювання цих вимог та вид (форма), регламентуючих «сухе зберігання документів (починаючи з національних стандартів і закінчуючи робочими інструкціями) можуть бути різними, що

визначається своєрідністю країн та застосовуваними системами зберігання. [1, 2]

Розглянемо детальніше міжнародний досвід використання С-сховищ для зберігання ВЯП, адже сховища саме цього типу використовуються на території України і є найбільш перспективними на сьогодні.

У Бельгії (табл.1) діє 7 ядерних реакторів. Для підвищення гнучкості поводження з ВЯП було прийнято рішення в міру необхідності побудувати на майданчику кожної АЕС спеціальне сховище. АЕС «Доель» була обрана для контейнерного сховища у спеціальній споруді. Обраний тип контейнера TN-24 має подвійне призначення і застосовується також для транспортування ВЯП. Серед вимог безпеки була поставлена і виконана задача забезпечення збереження ВЯП у випадку падіння військового літака. Завдання вирішене дешевшим за спорудження зміцненої будівлі сховища способом: створенням ударостійкого контейнера, що витримує удар літака F-16 масою 14,6 тон на швидкості 150 м/с.

Таблиця 1

## «Сухі» сховища ВЯП. Бельгія

Тип сховища	Місце зберігання	Поточний стан об'єкту	Об'єм, т
Реакторний басейн	Доель	Працює	2675
Тимчасове сховище («сухе»)			
Реакторний басейн	Тихандж		
Басейн тимчасового зберігання			

Джерело: розроблено авторами за даними [4]

У Чеській республіці (табл.2) 4 діючих реактори в Дуковани та два в Темеліні. На сьогодні перевага віддається багаторічному зберіганню відпрацьованого палива з ядерних реакторів контейнерах на території атомних електростанцій. Також планується після 2065 р. ввести в експлуатацію централізоване геологічне сховище для відпрацьованого ядерного палива та інших радіоактивних відходів. В якості основного модуля використовується металевий контейнер класу CASTOR, адаптований для палива ВВЕР – 440 (АЕС «Дуковани»), пристанційне сховище розраховане на 60 таких. Усі основні функції безпеки забезпечує сам контейнер, натомість будівля для проміжного зберігання в основному призначена для оптимізації операційних процедур, також для захисту від несприятливих погодних умов; крім того споруда є додатковим бар'єром захисту навколишнього середовища. Будівля має окрему зону для отримання контейнерів, відділену від основної бетонною стіною. Підлога сховища залізобетонна. Будівля має єдиний простір з колонами та легким сталевим дахом. Колони підтримують рейки для 130-тонного крану. Стіни сховища зроблені з легкого бетону та вкриті панелями. Усі переміщення контейнерів у сховищі здійснюються з допомогою крану.

Таблиця 2

## «Сухі» сховища ВЯП. Чехія

Тип сховища	Місце зберігання	Поточний стан об'єкту	Об'єм, т
Тимчасове сховище («сухе»)	Дуковани	Заповнене	603
		Працює, буде розширене	80
Тимчасове сховище («сухе»)	Темелін	Вводиться до експлуатації	-

Джерело: розроблено авторами за даними [4]

Сімнадцять енергетичних реакторів діють в Німеччині (табл.3) на дванадцяти майданчиках і всі знаходяться в процесі виведення з експлуатації. ВЯП після витримки у спеціальних реакторних басейнах вивантажують до контейнерів для зберігання та транспортування чи розміщують в тимчасових сховищах на території станції. Остаточне захоронення планується здійснити у глибоких геологічних формаціях без можливості вилучення відходів.

Таблиця 3

## «Сухі» сховища ВЯП. Німеччина

Тип сховища	Місце зберігання	Поточний стан об'єкту	Об'єм, т
Реакторний басейн + тимчасове сховище («сухе»)	Брунсбютель	Працює	76
	Крумель		125
	Брокдорф		322
	Унтервезер		217
	Гранде		425
	Емсланд		435
	Бібліс		704
	Філіпсбург		510
	Неісарвейтхайм		527
	Гундремінген		860
Тимчасове сховище («сухе»)	Ісар		556
	Грейсфолд		583
	Ахаус		55
	Горлебен		37

Джерело: розроблено авторами за даними [4]

В Угорщині (табл.4) діють чотири реакторних блоки (м. Пакш). Охолоджують ВЯП там у реакторних басейнах. Для тимчасового зберігання застосовують блочні «сухі пристрої. Остаточного рішення щодо переробки чи направлення до сховища ВЯП немає. Більш ймовірним є варіант прямого захоронення. Розглядається також варіант відправки ВЯП до Російської Федерації або сумісний його розподіл або довготривале зберігання на території утворення.

Таблиця 4

## «Сухі» сховища ВЯП. Угорщина

Тип сховища	Місце зберігання	Поточний стан об'єкту	Об'єм, т/м <sup>2</sup>
Тимчасове сховище («сухе»)	Пакш	Працює, буде розширене	719,7

Джерело: розроблено авторами за даними [4]

Литва нещодавно вивела з експлуатації два реактори в Ігналіні. ВЯП направляють до тимчасового «сухого сховища на 50 років, по факту його введення в експлуатацію після витримки у реакторних басейнах. Наразі провадяться дослідження з подальшої обробки відпрацьованого палива, розглядаються три варіанти: зберігання у Литві, зберігання чи переробка за кордоном. Ведеться розробка «сухого контейнерного сховища ВЯП Ігналінської АЕС (для ВЯП RBMK-1500). Спорудження сховища включає ряд стадій. Першою є ліцензування (успішно пройдене у 1998 році) контейнера класу CASTOR RBMK-1500. В подальшому планується перехід на використання для зберігання бетонних контейнерів системи CONSTOR. Основними вимогами до сховища у Литві є:

1. Термін зберігання до 50 років.

2. Можливість вивезення ВЯП з майданчика в будь-який час.

3. Час життя виробничої структури 50 років.

4. Пасивне тепловідведення.

5. Міцність при надзвичайній ситуації (падіння літака, землетрус)

Майданчик для зберігання захищений стіною з укріпленого бетону та бар'єром з системою попередження. Контейнери розміщуються вертикально на зміцненій бетонній підлозі. Відстань між центрами контейнерів складає близько трьох метрів. Система радіологічного моніторингу діє вздовж периметра сховища.

Таблиця 5

## «Сухі» сховища ВЯП. Литва

Тип сховища	Місце зберігання	Поточний стан об'єкту	Об'єм, т
Тимчасове сховище («сухе»)	Ігналіна	Працює, буде розширене	541,7

Джерело: розроблено авторами за даними [4]

Два енергетичних реактори працюють на румунській АЕС «Чернавода» (табл.6), також там планується спорудження ще одного. У реакторних басейнах здійснюють тимчасове зберігання відпрацьованого палива впродовж 6 років. Залишок палива зберігається в «сухих контейнерах приблизно 50 років та з 2050 року планується його остаточне захоронення у глибоких геологічних формаціях. Станом на 2009 рік відомо лише про наміри Румунії вирішувати проблему розширення сховища для відпрацьованого палива, про конкретні дії в цьому напрямку з відкритих джерел невідомо нічого.

Таблиця 6

## «Сухі» сховища ВЯП. Румунія

Тип сховища	Місце зберігання	Поточний стан об'єкту	Об'єм, т
Тимчасовий склад («сухий»)	Чернавода	Працює, буде розширений	159

Джерело: розроблено авторами за даними [4]

На території Словенії (табл.7) діє один енергетичний реактор на АЕС «Кршко», що знаходиться у спільній власності Словенії та Хорватії. Тимчасове зберігання ВЯП здійснюється у спеціальних басейнах на території атомної електростанції. Після закриття реактора відходить разом з ВЯП перемістять до «сухого сховища на 35 років. До 2020 року має бути ухвалене рішення щодо остаточного захоронення ВЯП. У 2065 планується введення в експлуатацію сховища на території Словенії, Хорватії чи третьої країни в глибокій геологічній формації.

Таблиця 7

## «Сухі» сховища ВЯП. Словенія

Тип сховища	Місце зберігання	Поточний стан об'єкту	Об'єм, т
Тимчасове сховище («сухе»)	Кршко	На стадії планування	323

Джерело: розроблено авторами за даними [4]

На 6 майданчиках в Іспанії (табл.8) експлуатують 8 реакторів, ще 2 знаходяться у процесі виведення з експлуатації. Довготривале зберігання ВЯП здійснюють як у зовнішніх басейнах чи контейнерах на території атомних електростанцій. Далі його переміщують до центрального сховища на зберігання впродовж більш як 60 років. В силу повільної

міжнародної розробки концепцій рішення про будівництво сховища ВЯП у геологічних формаціях відкладене.

Таблиця 8

**«Сухі» сховища ВЯП. Іспанія**

Тип сховища	Місце зберігання	Поточний стан об'єкту	Об'єм, т
Контейнер для зберігання	Гвадалахара	Працює	923

Джерело: розроблено авторами за даними [4]

У Росії на даний момент працюють 32 енергетичних реактори. Накопичене внаслідок їхньої діяльності ВЯП спершу зберігають у реакторних басейнах від 3 до 5 років. Затим, залежно від типу реактора, тепловиділяючі елементи направляють на переробку або ж до тимчасових сховищ. Це можуть бути централізовані чи пристанційні сховища (переважно басейни). В майбутньому надаватиметься перевага «сухим тимчасовим сховищам».

На даний момент у США працює 104 енерге-

тичних реактори. Поводження з виробленим на них ВЯП регламентує Концепція поведінки з цивільними відходами.

Відпрацьоване паливо зберігається у басейнах на території атомної електростанції. До того ж на території половини реакторі розташовані установки для тимчасового зберігання, що не залежать від самого реактора. Аби збільшити ємність для зберігання, застосовуватимуться коробки для «сухого зберігання, що в свою чергу, будуть розташовані в бетонних бункерах чи контейнерах. [3]

**Висновки і пропозиції.** Підсумовуючи слід зазначити, що попри використання ядерної енергії впродовж більш як 50 років жодна країна не розробила та не запровадила ефективну стратегію утилізації усіх видів відходів та ВЯП зокрема. Тому все більшого поширення набуває технологія «сухого» зберігання ВЯП впродовж тривалого часу – так зване відкладене рішення, а отже досліджувана тема потребує подальшої розробки для сприяння фахівцям у пошуку найбезпечнішого типу «сухого» сховища.

**Список літератури:**

1. Андрюшин И.А. Обзор проблем обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом / Андрюшин И.А., Юдин Ю.А. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010 г. – Часть II. – С. 83-94.
2. Радиоактивные отходы АЭС и методы обращения с ними: Моногр. / А.А. Ключников, Э.М. Пазухин, Ю.М. Шигера, В.Ю. Шигера. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины, 2005 г. – Гл. 27. – С. 410-417
3. Утилизация Ядерных отходов в Европейском союзе: Рост объемов и никакого решения. – Воронеж. – 2011 г. – С. 27-68.

**Коньшин В.И., Вишнеvский П.Ф.**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

## ИЗУЧЕНИЕ МЕЖДУНАРОДНОГО ОПЫТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ «СУХИХ» ХРАНИЛИЩ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА КОНТЕЙНЕРНОГО ТИПА

**Аннотация**

Был рассмотрен международный опыт «сухого» хранения отработавшего ядерного топлива. Кратко описаны типы хранилищ «сухого» хранения. Приведены данные об использовании хранилищ контейнерного типа в разных странах.  
**Ключевые слова:** отработанное ядерное топливо, «сухое» хранение, международный опыт, типы хранилищ, контейнерные хранилища.

**Konshyn V.I., Vyshnevskyi P.F.**

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

## STUDY OF INTERNATIONAL EXPERIENCE IN THE USE OF «DRY» SPENT FUEL STORAGE OF CONTAINER TYPE

**Summary**

Investigated international experience of «dry» storage of spent nuclear fuel. Briefly described types of repositories of «dry» storage. Indicated data on the use of storage container type in different countries.

**Keywords:** spent nuclear fuel, «dry» storage, international experience, types of storage, container storage.