

А. Ю. Андрианов¹, Є. О. Джур¹, Ю. О. Крикун¹, В. А. Білоус²,
С. Ю. Саєнко²

¹ДП “Виробниче об'єднання Південний машинобудівний завод ім. О. М. Макарова”, Дніпропетровськ

²ННЦ “Харківський фізико-технічний інститут” НАН України, Харків

МОДУЛЬНЕ СХОВИЩЕ ДЛЯ ДОВГОСТРОКОВОГО КОНТРОЛЬОВАНОГО ЗБЕРІГАННЯ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ НИЗЬКОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ АКТИВНОСТІ

Анотація: Розроблено та виготовлено зразок повнофункціонального елемента модульного сховища для зберігання радіоактивних відходів низької та середньої активності на основі утилізованого транспортно-пускового контейнера ракетноносія стратегічного призначення. Досліджено та розроблено композит, призначений для виготовлення радіаційно-захисного покриття основного елемента модульного сховища. Теоретично обґрунтовано і експериментально доведено оптимальний склад композиту, що задовольняє вимогам радіаційної безпеки персоналу. Розроблена експериментальна технологія виготовлення радіаційно-захисного покриття з досліджуваного композита. Результати дослідження визначають умови створення серійного виробництва модульних сховищ для зберігання радіоактивних відходів низької та середньої активності.

Ключові слова: зберігання радіоактивних відходів, модульне сховище, елемент модульного сховища, радіаційно-захисні покриття, експериментальна технологія виготовлення, композит, хімічний склад, фізико-механічні властивості.

А. Ю. Андрианов, Е. А. Джур, Ю. А. Крикун, В. А. Белоус, С. Ю. Саенко. МОДУЛЬНОЕ ХРАНИЛИЩЕ ДЛЯ ДОЛГОСРОЧНОГО КОНТРОЛИРОВАННОГО ХРАНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ НИЗКОЙ И СРЕДНЕЙ АКТИВНОСТИ.

Аннотация: Разработан и изготовлен образец полнофункционального элемента модульного хранилища для хранения радиоактивных отходов низкой и средней активности на основе утилизированного транспортно-пускового контейнера ракетносителя стратегического назначения. Исследован и разработан композит, предназначенный для изготовления радиационно-защитного покрытия основного элемента модульного хранилища. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден оптимальный состав композита, удовлетворяющий требованиям радиационной безопасности персонала. Отработана экспериментальная технология изготовления радиационно-защитного покрытия из исследуемого композита. Результаты исследования определяют условия создания серийного производства модульных хранилищ для радиоактивных отходов низкой и средней активности.

Ключевые слова: хранение радиоактивных отходов, модульное хранилище, элемент модульного хранилища, радиационно-защитные покрытия, экспериментальная технология изготовления, композит, химический состав, физико-механические свойства.

A. Yu. Andrianov, Ye. A. Dzhur, Yu. A. Krikun, V. A. Belous, S. Yu. Sayenko. MODULAR REPOSITORY FOR LONG-TERM STORAGE OF LOW AND INTERMEDIATE RADIOACTIVE WASTE.

Abstract: Full-scale prototype of modular repository for storage of low and intermediate radioactive waste is developed and manufactured. Prototype of modular repository based on utilized transportation and launch container of strategic launch-vehicle. Composite material for manufacture of radiation-shielding coating of mentioned prototype is investigated and developed. Optimum material's composition meeting the radiation safety requirements for repository personnel is grounded and experimentally approved. Technology of radiation-shielding coating manufacture is refined experimentally. Results of research works promote small-lot production of modular repositories for storage of low and intermediate radioactive waste.

Keywords: : radioactive waste storage, modular repository, element of modular repository, radiation-shielding coatings, experimental technology of manufacturing, composite, chemical composition, physical-mechanical properties.

1. АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ

Наразі в Україні надзвичайно актуальною є проблема зберігання радіоактивних відходів (РАВ), які виникли в результаті аварії на Чорнобильській АЕС. Існуючі пункти тимчасової локалізації радіоактивних відходів (ПТЛРВ) та пункти захоронення радіоактивних відходів (ПЗРВ) для РАВ низької та середньої активності, які розташовані на території 30-кілометрової Чорнобильської зони відчуження, практично не задовольняють вимогам радіаційної безпеки. Тільки ПЗРВ "Буряківка" відповідає нормативам захоронення РАВ даного типу. Однак ресурси сховища при досягнутих темпах надходження РАВ практично вичерпані [1].

Слід зазначити також, що 8 000 підприємств та установ України використовують радіоактивні матеріали і приблизно 5 500 продовжують напрацьовувати РАВ низької та середньої активності [2]. На даний момент на території України накопичено близько 3 млн кубометрів РАВ. Отже, виникла гостра проблема їх зберігання та утилізації [3]. Більш ніж 90 % від загальної кількості відходів складають відходи з високим вмістом довгоіснуючих радіонуклідів. Згідно з законодавством України для забезпечення високого рівня безпеки довгоіснуючі відходи, що містять ізотопи з великим періодом піврозпаду, підлягають ізоляції в глибоких геологічних формаціях [4].

Розробка та експлуатація подібних споруд вимагає особливого підходу, високих технологій та значних капіталовкладень [5]. В Україні споруди для ізоляції РАВ в глибоких геологічних формаціях відсутні, прийняття рішення щодо їх спорудження відкладене на невизначений строк.

Згідно з загальносвітовою практикою як альтернативний спосіб захоронення РАВ в геологічних формаціях довгоіснуючі відходи підлягають тимчасовому контрольованому зберігання в спеціальних сховищах [6]. Наявні сховища, як відмічалось вище, не задовольняють всім вимогам радіаційної безпеки. Порушення правил поводження з РАВ цього типу, а також недооцінка їх потенційної небезпеки може призвести до тяжких наслідків як для навколишнього середовища, так і для здоров'я населення України.

2. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є розробка та виготовлення основного елементу сховища модульного типу для РАВ низької та середньої активності з суттєво підвищеними (порівняно з традиційними сховищами) експлуатаційними та захисними характеристиками. Це завдання можна вирішити шляхом проведення комплексу дослідних, конструкторських та технологічних робіт, спрямованих на забезпечення радіаційного захисту персоналу, що обслуговує схо-

вище, та виконання технічних і технологічних операцій для забезпечення виготовлення повномасштабного елемента модуля (діаметром до 3,5 м, висотою 1,5–2,5 м) із заданими характеристиками. Об'єктом дослідження є основний елемент сховища модульного типу для зберігання РАВ.

3. ТЕХНІЧНИЙ ПІДХІД

Проблему безпечного зберігання РАВ в Україні пропонується вирішити, створивши модульні сховища на основі елементів утилізованих ракетноносіїв стратегічного призначення та передових технологій ракетно-космічної галузі. Як основний елемент модульного сховища запропоновано використати транспортно-пусковий контейнер (ТПК) ракетноносія РЗ6-М. Обґрунтування такого підходу для вирішення безпечного контрольованого зберігання відходів пов'язане зі значними перевагами порівняно з існуючими сховищами та технологією їх реалізації:

- універсальність і мінімальні капіталовкладення, пов'язані з мінімальними доробками для забезпечення відповідності ТПК конструкціям ємностей, які використовуються для тимчасового зберігання або захоронення РАВ;
- невеликий строк реалізації, що забезпечується за рахунок наявних на підприємствах ВПК України утилізованих виробів ракетноносіїв;
- забезпечення надійної ізоляції РАВ за рахунок високих експлуатаційних характеристик композиційного матеріалу ТПК;
- забезпечення конверсії високих ракетно-космічних технологій в галузь екології та захисту навколишнього середовища;
- опосередковане вирішення проблеми остаточної утилізації елементів і вузлів бойових ракетних комплексів.

Слід зазначити, що деякі виробниці космічної промисловості України експлуатуються в

мирних цілях дотепер, при цьому по ряду характеристик вони не мають аналогів. Це наслідок використання при розробці космічних систем високих технологій, передових конструкцій, а також унікальних композиційних матеріалів.

4. ОБґРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Існуючі сховища були побудовані з використанням конструкційних матеріалів, які широко використовуються в будівництві. Останнім часом ці конструкційні матеріали модифікуються для збільшення специфічних характеристик, що відіграє важливу роль при експлуатації сховища. Основними конструкційними матеріалами є бетон і сталь.

Бетон займає визначене місце серед матеріалів, що використовуються для будівництва сховищ РАВ, завдяки порівняно низькій вартості. Широке застосування знайшли такі модифікації бетону: залізобетон, фібробетон, полімербетон, бетони на основі важких наповнювачів. Останні використовуються для зменшення рівня проникаючого із споруди випромінювання. Однак аналіз характеристик бетонів після їхньої тривалої експлуатації виявив ряд їх недоліків, пов'язаних з відносно високою водопроникністю, високою крихкістю і навіть корозією (вилучення з бетону іонів кальцію ґрунтовими водами (вилучення)).

Ще є один матеріал, що збільшує твердість і міцність системи і широко використовуються в конструкціях сховищ як додатковий компонент – це сталь. Сталь є міцним конструкційним матеріалом, однак велика схильність до корозії (для легованих сталей – до крапкової корозії) зменшує використання даного матеріалу для будівництва сховищ.

На сьогодні ведеться ще ряд цікавих досліджень, спрямованих на поліпшення властивостей існуючих сховищ. Так, проводяться аналіз компонентів, які зменшують вилучення

бетонів [7] і пошук нових стійких матеріалів серед древніх архітектурних споруджень [8]; здійснюється відновлення порушеної цілісності сховища за допомогою тонкоплівочного покриття на основі оксиду цирконію [9]; ведуться розробки нових матеріалів і технологій для кондиціонування РАВ [10] тощо. Однак дані модифікації збільшують вартість як самих матеріалів, так і існуючих сховищ в цілому, при цьому визначається тільки екстрапольована надійність. Отут і виникає питання про використання принципово нових матеріалів в галузі зберігання РАВ.

Для виготовлення ТПК ракет використовується композиційний матеріал – модифікований склопластик на основі епоксидної смоли, який має високі питомі фізико-механічні властивості, що перевищують такі ж властивості сталі і бетону. За результатами експлуатації матеріалу в умовах сонячної радіації, окислення, підвищеної вологості та промислової загазованості протягом 30-и років слідів коро-

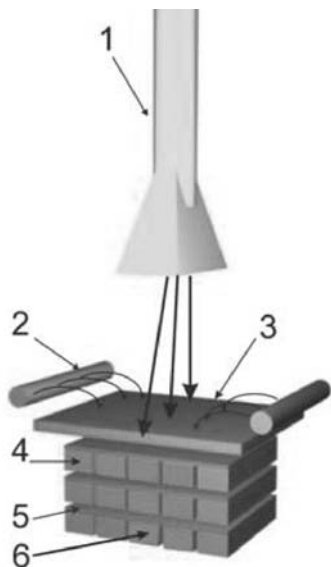


Рис. 1. Схема опромінення зразків: 1 – прискорювач зі скануючим пристроєм, 2 – розбризкувач охолоджуючої води, 3 – свинцевий конвертор, 4 – комірки для зразків, 5 – плівкові дозиметри, 6 – місця розміщення зразків

зії на ньому не виявлено, що свідчить про його високу хімічну і атмосферну стійкість [11]. Радіаційні дослідження композиційних матеріалів на основі епоксидних смол підтверджують доцільність їх використання як матеріалу для сховищ РАВ низької та середньої активності [12].

У ході дослідження придатності композиту ТПК для довгострокового зберігання РАВ було проведено його випробування на радіаційне старіння шляхом опромінення зразків композиту γ - та β -променями. Ці види опромінення є основними джерелами з загальною дозою 10 МГр руйнуючого радіаційного впливу РАВ на композит, що відповідає зберіганню відходів впродовж 300 років. Опромінення зразків проводилося в ННЦ ХФТІ НАНУ на лінійному прискорювачі електронів КУТ-1 при енергії пучка β -випромінювання 12 МеВ, середньому струмі пучка 550 мкА (струм в імпульсі – 0,6 А, частота посилок – 300 Гц, тривалість імпульсу – 3,4 мкс). Схема опромінення наведена на рис. 1.

Прямокутні зразки (підготовлені для випробувань на міцність) пакували в контейнери й розташовували в три шари за свинцевим конвертором товщиною 7 мм. При опроміненні зразків β -випромінюванням конвертер знімали. Між шарами розміщували плівкові детектори для контролю поглиненої дози (по два детектори на кожен зразок). Для запобігання перегрівання під потужним електронним пучком конвертор охолоджували дистильованою водою. Контроль дози на плівкових дозиметрах показав, що різниця поглинених доз між верхнім і нижнім шарами досягає 15%. Зразки, опроміненні γ -квантами, мали високу активність, яка обумовлена реакціями трансмутації (γ, n)-, (γ, p)-ядер домішок композиту при високих енергіях випромінювання (8–10 МеВ). Але в реальних умовах опромінення зразків РАВ не супроводжується високими енергіями, тому й не буде виникати активації матеріалу.

Опромінені зразки в металевих чохлах після витримки протягом 20 днів (для зниження їх активності) були піддані дослідженню механічних характеристик та зовнішнього вигляду. Один із зразків композиту після зняття чохла був ретельно оглянутий зовні (рис. 2) і проконтрольований за допомогою оптичних методів аналізу з використанням оптичного мікроскопа.

Дослідження показали відсутність змін поверхні зразка (наявність кольорів мінливості, нальотів і т. д.). Механічні властивості зразків визначалися за методикою, що відповідає ДОСТ 11262-80 (СТРЕВ 1199-78 "Метод випробування на розтягнення"). Міцність зразків зменшилася не більше 20 % при β -випромінюванні і не більше 5 % при γ -опромінюванні. Таким чином, було показано, що досліджувані зразки мають високу радіаційну стійкість у процесі γ - та β -опромінювання.

5. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

Модульне сховище РАВ повинне задовольняти всім основним національним і міжнародним регулятивним нормам безпеки [13]. Першим і найважливішим пунктом цих нормативів є принцип безпеки і здоров'я людей. Отже, крім доробок і дооснащень конструкції ТПК необхідно забезпечити прийнятний рівень захисту персоналу, який обслуговує сховище, від впливу проникаючих іонізуючих випромінювань.

Згідно з попереднім аналізом авторами було встановлено, що стінка корпусу модуля не забезпечує належного рівня захисту з точки зору оптимізації радіаційного захисту при контролі опромінювання персоналу [14]. Як захисний елемент в конструкції контейнера було використане покриття на основі радіаційно-захисних композиційних матеріалів (РЗКМ). Розробка РЗКМ заснована на фізичному ефекті аномального ослаблення рентгенівського та



Рис. 2. Зовнішній вигляд зразка після опромінювання

γ -випромінювання полі- та ультрадисперсними середовищами [15]. Застосування полідисперсних порошоків-модифікаторів дає можливість створити умови, за яких зростає перетин поглинання випромінювання, що є наслідком інтенсивного когерентного розсіювання квантів на атомах ультрадисперсних часток та відповідного збільшення оптичної довжини пробігу квантів [16, 17].

Дослідження захисних властивостей композиту проводилось на зразках з різним компонентним складом. Попередньо було досліджено хімічний та гранулометричний склад наповнювачів, які мають найкращі захисні властивості. За основу наповнювача був прийнятий вольфрамовий полідисперсний порошок (за ТУ 48-19-352-83). З метою отримання рівномірної періодичної структури і розподілу порошку вольфраму в об'ємі модифікатора як допоміжного наповнювача були випробувані різні матеріали (силікатна маса, крейда, базальтове волокно). Електронно-мікроскопічний аналіз порошку вольфраму показав, що відносно високий вміст вологи обумовлює групування окремих порошинок у конгломерати (рис. 3).

У зв'язку з цим порошок вольфраму перед використанням осушували і розмелювали. Осушування проводили у вакуумній сушильній шафі протягом 12 год при температурі

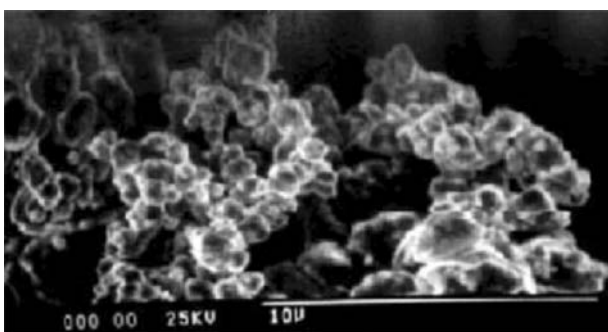


Рис. 3. Структура порошку вольфраму у стані поставки

1 200–1 400 °С і залишковому тиску 0,33 Па. Після сушки порошок подрібнювали у кульовому млині ШМ-314 виробництва Кіровоградського комбінату твердих сплавів. Після цього порошок вольфраму просіювали через сито з вічками діаметром 40 мкм. Подрібнювання порошку дає можливість збільшити вміст ультрадисперсної фракції, що сприяє ослабленню γ -випромінювання.

Радіаційно-захисні властивості порошку визначали шляхом вимірювання коефіцієнта лінійного ослаблення приладом типу МКС-01Р за методикою виконання вимірювань коефіцієнта ослаблення γ -випромінювання біологічним захистом на установці УПГД-2 в умовах геометрії вузького пучка випромінювання. Погрішність вимірювання не перевищує 7%. Вплив відносного вмісту вольфраму в сумішах з вказаними додатковими компонентами на коефіцієнт лінійного ослаблення для енергій 660 кеВ (^{137}Cs) визначали на зразках з різним вмістом вольфраму. В результаті отримали експонентну залежність коефіцієнта ослаблення від вмісту вольфраму. Виходячи з економічних міркувань та на підставі аналізу отриманих результатів виготовлення модифікатора зупинилися на складі із вмістом 72 % вольфраму.

Як допоміжний наповнювач була використана крейда, оскільки насипна вага модифікатора з крейдою в 1,6 разів менша, ніж з силікатною масою. Перерахунок лінійного коефіцієнта ослаблення, що визначався за вка-

заним методом (але в геометрії широкого пучка з урахуванням різниці в насипній вазі), показав, що заміна в модифікаторі силікатної маси на крейду не тільки не погіршує, але навіть в 1,25 разів підвищує радіаційно-захисні властивості модифікатора.

Для аналізу матриць композиту було обрано силікатно-керамічну суміш та епоксидний компаунд. Згідно з визначеним коефіцієнтом лінійного ослаблення зразки на основі епоксидного компаунду з різним вмістом модифікатора мали більші значення, ніж зразки на основі силікатно-керамічної суміші. Крім того, контрольні механічні випробування на розривній машині відповідно до ДОСТ 7762-74 показали, що руйнівні напруги зразка на основі компаунду та зразка на основі суміші відрізняються майже на порядок. Це обумовило розробку захисного композиту з використанням епоксидного компаунду.

Важливою перевагою епоксидного компаунду також є висока адгезія до різних конструкційних матеріалів, що необхідно враховувати при аналізі конструкційних та технологічних особливостей нанесення покриття на оболонку ТПК. При будь-яких методах нанесення (за рахунок адгезії або при механічному з'єднанні плиток захисного композиту) адгезійні властивості композиту враховуються безпосередньо або опосередковано при створенні клейових сумішей для замазки щілин, зазорів або нерівностей.

Для аналізу властивості адгезії компаунду було виготовлено ряд зразків, які склалися з двох пластин склопластику, з'єднаних клейовою композицією на основі епоксидного компаунду з різним вмістом модифікатора та затверджувача. Критерієм адгезійних властивостей компаунду є руйнуюча напруга. За допомогою програми статистичного аналізу "ПРІАМ" були оброблені результати випробувань і одержана математична модель зміни адгезії матеріалів в залежності від вмісту модифікатора та затверджувача:

$$Y = 1.8717 + 0.3446 \cdot x_2 - 0.4034 \cdot 3x_1 \cdot z_2,$$

де x_1, x_2, z_2 – фактори моделі, що визначаються згідно з виразом

$$x_1 = 0.015 \cdot (X_1 - 93.3333),$$

$$x_2 = 0.25 \cdot (X_2 - 12),$$

$$z_2 = 1.5 \cdot (x_2^2 - 0.6667);$$

де X_1 – маса модифікатора на 100 г смоли; X_2 – маса затверджувача на 100 г смоли.

На рис. 4 наведено графік дослідження поверхні відгуку у тривимірному просторі.

По вісі X_1 відкладено перший фактор – кількість модифікатора на 100 г смоли в межах 40–160 вагових частин (в. ч.), по вісі X_2 – кількість затверджувача на 100 г смоли в межах 8–16 в. ч., Y – відгук, що дорівнює середньому для двох експериментів значенню руйнуючої напруги в межах 1,33–2,43 МПа. Взаємодія факторів X_1 і X_2 робить поверхню відгуку криволінійною, але в загальному при збільшенні затверджувача та модифікатора виявляється тенденція зростання адгезії до значення 2,43 МПа, потім збільшення модифікатора приводить до зменшення адгезії.

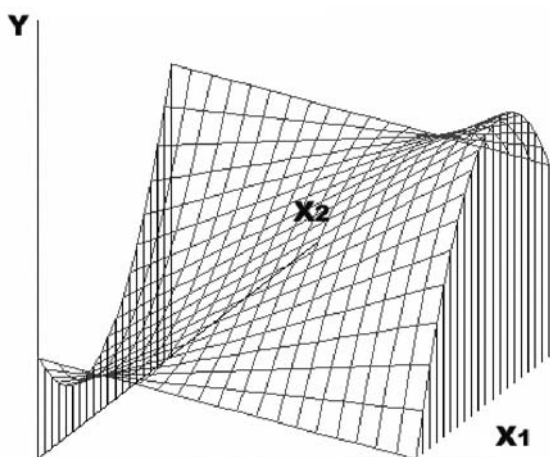


Рис. 4. Графік впливу досліджених факторів на адгезійну міцність епоксидного компаунду

Ще одним із перспективних напрямків створення ефективних систем захисту від γ -випромінювання є комбінація шарів з різних за масою матеріалів. З метою встановлення придатності таких систем для їх використання при виготовленні елементу модуля було проведено дослідження проходження γ -випромінювання через комбінації шарів із різних матеріалів. Дослідження проводились як на виготовлених вакуумною прокаткою металевих фольгах, так і на плівкових шарах, що були отримані вакуумно-дуговим методом на установці типу "Булат" [18].

В рамках дослідження було проведено експеримент з метою визначення залежності коефіцієнта ослаблення фотонного випромінювання тришаровими комбінаціями з тонких (порядку довжини вільного пробігу фотонів) шарів різних металів від порядку їхнього розташування стосовно джерела випромінювання. Досліджувалися різні комбінації фольг: Al–Ti–Mo, Ti–Mo–Pb, Al–V–Zr, V–Zr–Pb та ін. Джерела випромінювання давали можливість одержати γ -кванти з енергією від 7 до 220 кеВ. В експерименті враховувалася лише низькоенергетична частина випромінювання від 7 до 107 кеВ, що була розбита на десять рівних інтервалів з кроком 10 кеВ.

Критерієм оцінки захисних властивостей зразків з різною послідовністю металів є параметр η , який дорівнює відношенню інтенсивності випромінювання, що пройшло, при розміщенні металу з найбільшим атомним номером з боку джерела до інтенсивності пройденого випромінювання при розміщенні металу з найменшим атомним номером з боку джерела. Вимірювання проводилися з використанням спектрометра на основі германійового радіаційного детектора рентгенівського і γ -випромінювання типу ДРГ-5-2 з енергетичною роздільною здатністю на напіввисоті розподілу 1,1 кеВ при енергії 122 кеВ (^{57}Co) і 3,6 кеВ при енергії 622 кеВ (^{137}Cs). Похибки вимірювань середньої інтенсивності для серії

зразків на обраних інтервалах енергії випромінювання склали не більше 4,1 % при довірчій імовірності 0,9.

В результаті експерименту було встановлено, що для всіх розглянутих наборів $\eta > 1$. Це однозначно вказує на факт існування стійкої залежності коефіцієнта ослаблення γ -випромінювання в зазначеному інтервалі енергій від порядку розташування легких та важких металів стосовно джерела.

Нанесення на модуль покриттів, виготовлених на основі досліджених і розроблених матеріалів, можна провести різними способами: напилюванням, литтям, механічним з'єднанням (роз'ємним або нероз'ємним). З аналізу цих методів було встановлено, що перші два мають багато недоліків, серед яких основними є: складність в забезпеченні рівномірності та однорідності покриття, обов'язкове проведення попередньої обробки поверхні оболонки модуля, розробка спеціальних технологічних приладів для лиття або напилювання покриття. Найбільш оптимальним способом нанесення покриття є застосування його у вигляді плитки, що кріпиться до оболонки за допомогою механічного з'єднання. Перевагами методу є відносна простота виготовлення плитки та технології її нанесення, підвищена міцність, що зумовлена механічним з'єднанням. Були розглянуті різні варіанти кріплення плитки та виявлені їх основні недоліки: виникнення прохідних отворів, що потребує додаткових прокладок та герметиків (болтове), необхідність розробки високонадійного та радіаційно-стійкого клею (клейове), складність конструкції (засувкою). Найбільш раціональним є кріплення плиток до оболонки гвинтовим з'єднанням (для плиток невеликої товщини – за допомогою самонарізних гвинтів). При використанні плиток великої товщини розроблена спеціальна конструкція, яка включає додаткові елементи кріплення: скобу та дюбель, що встановлюється в отворі оболонки з натягом. Плитка має спеціальну

форму з кривизною, яка відповідає діаметру ТПК, та скоси на гранях для зменшення щілин та рознімань, що виникають між сусідніми плитками при установці їх накривом. Загальний вигляд кріплення плиткового покриття значної товщини наведений на рис. 5.

Згідно з вимогами встановленого методу нанесення покриття на оболонку ТПК була відпрацьована технологія виготовлення плиток методом просочування склотканини модифікатором та епоксидним компаундом на основі зв'язувального ЕДТ-10П. Нанесення вказаної суміші на склотканину фарборозпилювачем, методом втирання, а також ручним одно- і двостороннім просоченням не забезпечує рівномірного нанесення модифікатора на поверхню склотканини (розбіжність вмісту модифікатора в просоченій тканині складає більше 5 %). Крім того, після просочення і сушіння спостерігається збільшення твердості тканини, що приводить до труднощів подальшого нанесення на неї епоксидного компаунду з модифікатором. Якісне та рівномір-

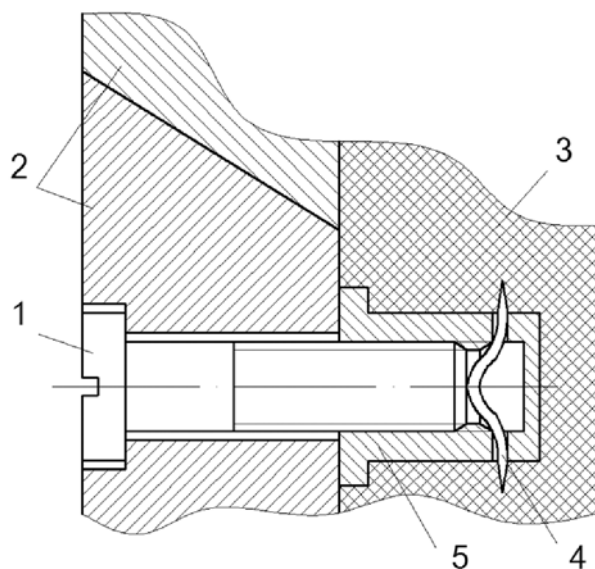


Рис. 5. Схема закріплення плиткового покриття значної товщини: 1 – гвинт, 2 – плитка покриття, 3 – фрагмент ТПК, 4 – скоба, 5 – дюбель



Рис. 6. Зразок покриття на фрагменті ТПК

не нанесення модифікатора на склотканину (розбіжність вмісту модифікатора – не більш 2%) і одержання якісного препрегу, придатного для виготовлення виробів з склопластику методом пресування або намотування, можна забезпечити при машинному просоченні із перемішуванням стисненим повітрям.

З огляду на позитивні результати, отримані при нанесенні на склотканину епоксидного компаунду з модифікатором способом машинного просочення дана технологія рекомендується для виготовлення препрегу при серійному виробництві композиційного матеріалу. Для одиничного виробництва достатньо одержання препрегу методом втирання або занурення.

На основі результатів проведених досліджень, розроблених конструкцій та відпрацьованих технологій виготовлено ряд експериментальних зразків – плиток для захисного покриття, які закріплені гвинтовим з'єднанням до фрагменту оболонки ТПК (рис. 6).

Лінійні коефіцієнти ослаблення розроблених зразків та їх компонентів (фрагментів

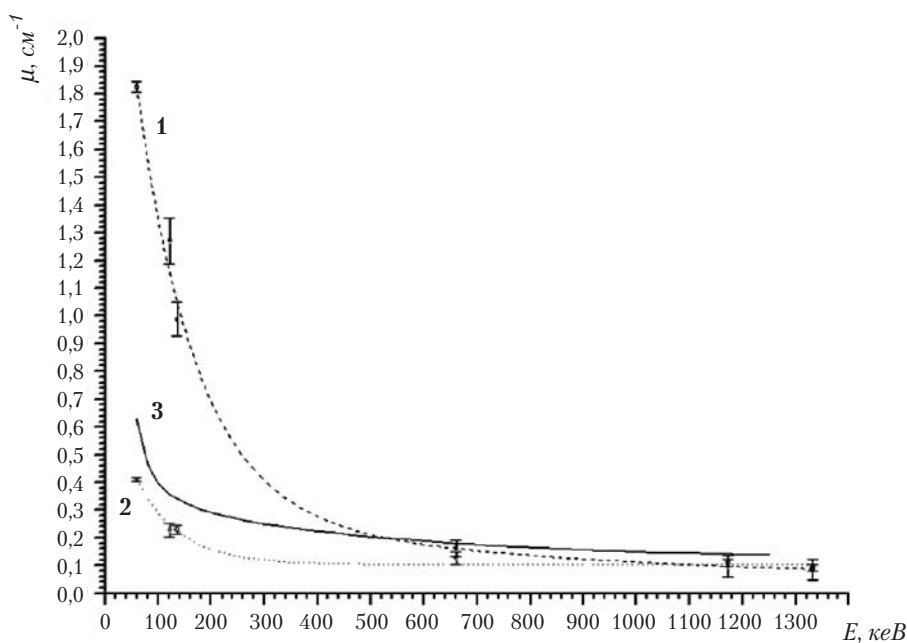


Рис. 7. Енергетична залежність коефіцієнтів ослаблення фрагменту покриття (1), ТПК (2) та бетону (3)

оболонки ТПК щільністю $1,7 \text{ г/см}^3$ та захисного покриття щільністю $2,0 \text{ г/см}^3$) визначалися спектрометричним методом в геометрії вузького пучка. У спектрометрі встановлювався детектор типу ДРГ-5-2 у випадку застосування джерела з ^{241}Am і типу ДГДК-68В у випадку застосування джерел з ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{60}Co .

На рис. 7 зображені апроксимовані за експериментальними даними криві залежності лінійного коефіцієнта ослаблення від енергії фотонів для фрагменту ТПК і покриття виробу.

Для порівняння наведена аналогічна крива для бетону. В діапазоні енергій до 200 кеВ коефіцієнт ослаблення матеріалу покриття майже в 3 рази перевершує коефіцієнт ослаблення бетону, при цьому щільність цього матеріалу помітно менша від щільності бетону. З ростом енергії коефіцієнти зближуються і, починаючи з енергії близько 500 кеВ, вирівнюються. Фрагмент ТПК практично у всьому інтервалі енергій поступається бетону як захисний матеріал (коефіцієнт ослаблення приблизно в 2 рази менший, ніж у бетону). В області високих енергій фрагмент покриття і бетон у межах погрішності вимірів мають однаковий лінійний коефіцієнт ослаблення. Але оскільки щільність як фрагменту, так і покриття менші щільності бетону, можна мати виграш у вазі захисних конструкцій при однаковій кратності ослаблення випромінювання.

6. ВИГОТОВЛЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДУЛЯ

В результаті проведених науково-дослідних робіт було виготовлено повнофункціональний прототип у вигляді секції елемента модульного сховища (рис. 8).

Секція являє собою великогабаритну ємність – секцію транспортно-пускового контейнера ракетоносія РЗ6-М, котра призначена для довгострокового зберігання радіоактивних відходів низької та середньої активності. Згідно з проектом модульного сховища ос-

новний елемент (модуль) складається з ряду секцій, що визначають довжину всього елемента, кришки та днища. Експлуатаційна місткість розробленої секції модуля складає 19 м^3 при діаметрі 3,2 м.

Найбільш оптимальною установкою модуля є вертикальна. Вертикальна установка забезпечує мінімум займаної площі, достатню стійкість, мінімум поверхні впливу атмосферних опадів, якщо сховище знаходиться поза додатковим приміщенням, і мінімум радіаційного фону на рівні людського росту (див. рис. 8).

Важливо також відмітити, що при вертикальному розміщенні модуля відповідає необхідність застосування захисних засобів на кришці та днищі контейнера, оскільки випромінювання через дані елементи не потрапляє в зону присутності персоналу. Це скорочує кількість засобів захисту на одиницю площі модуля. Крім того, скорочується час і трудозатрати на реалізацію декількох типів засобів захисту (засоби захисту на циліндричній частині контейнера і на поверхні його днища або кришки істотно відрізняються за формою).

7. ВИСНОВКИ

В результаті виконання дослідної роботи, пов'язаної зі створенням нових засобів безпечної довгострокової ізоляції РАВ, досягнуто:

- на базі вітчизняних наукомістких технологій розроблено та виготовлено дослідний демонстраційний зразок основного елемента модульного сховища для РАВ з високоефективними захисними покриттями на його внутрішній поверхні, який за захисними та ваговими характеристиками перевищує аналогічні конструкції з інших матеріалів;
- згідно з проведеним аналізом основних характеристик існуючих сховищ РАВ обґрунтовано доцільність створення нових сховищ з використанням сучасних вітчизняних композиційних матеріалів;



а



б

Рис. 8. Функціональний односекційний прототип основного елемента модульного сховища: зовнішній вигляд (а) і розміщення ємностей з РАВ (б)

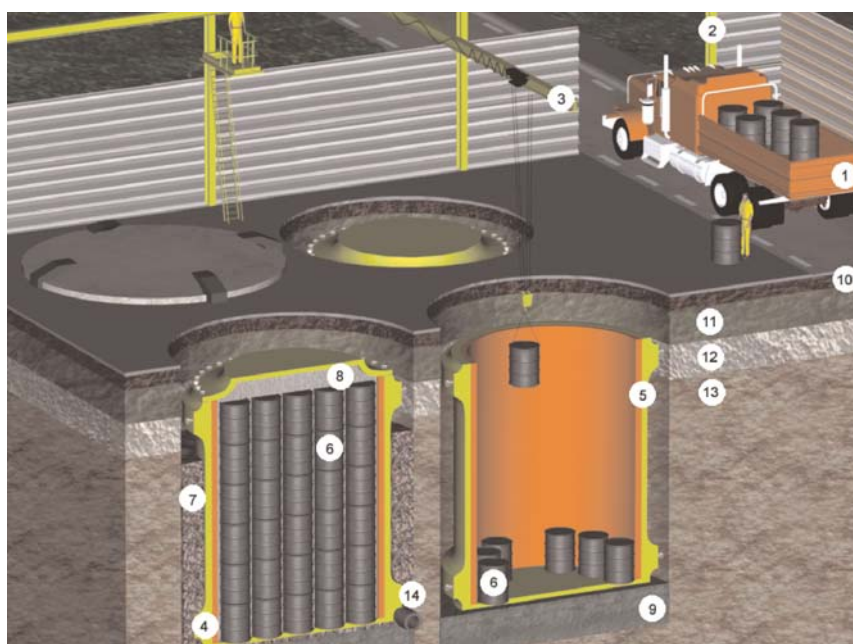
- досліджено зміну механічних властивостей композиційного матеріалу, одержуваного на базі ракетних технологій, під дією γ -опромінення, показано перспективність його використання для виготовлення сховищ, де можна розміщувати низько- та середньоактивні РАВ для довгострокового зберігання;

- розроблено та реалізовано технології виготовлення основного елемента модуля та захисних покриттів з модифікаторами;
- розроблено серію захисних композицій на основі модифікаторів з дисперсними наповнювачами, які мають коефіцієнт ослаблення γ -квантів у діапазоні енергій 7–130 кеВ на рівні 2,3–27 разів, що значно перевищує захисні характеристики найбільш поширеного при будівництві сховищ РАВ бетону;
- розроблено дослідні процеси одержання багатошарових металевих композицій на базі вакуумно-дугових технологій, досліджено їх захисні властивості при проходженні γ -квантів, показано неоднорідність властивостей даних матеріалів при проходженні через них γ -квантів та перспективність таких композицій для ефективного захисту РАВ.

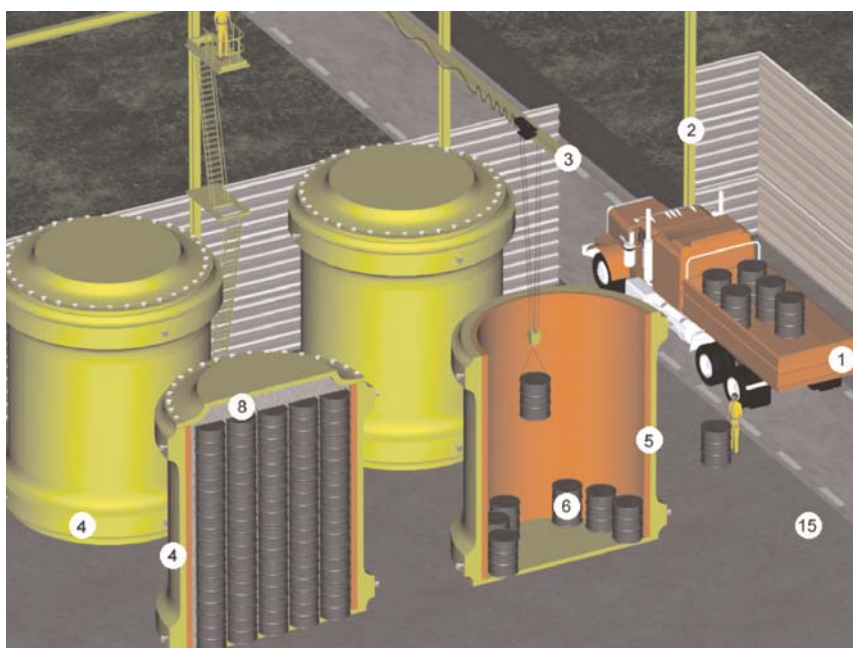
8. РЕКОМЕНДАЦІЇ

На підставі результатів роботи рекомендовано перейти до створення та розміщення на одному із полігонів для зберігання РАВ (УкрДО "Радон") дослідного зразка сховища з використанням розробок за цим проектом. Сховище модульного типу за рядом характеристик буде перевершувати відомі вітчизняні та зарубіжні сховища та заощаджуватиме матеріали для їх виготовлення. Розроблені технології виготовлення основного елемента модуля можуть бути використані при створенні сховищ для хімічних та інших небезпечних відходів.

На рис. 9 подано схематичне зображення можливих варіантів розміщення модуля, зібраного з основних елементів для збереження РАВ. Можливе також використання розробок за цим проектом для виробництва транспортних та універсальних контейнерів для РАВ, будівельних γ -захисних матеріалів, робочого γ -захисного одягу та переносних бар'єрів.



а



б

Рис. 9. Варіанти реалізації модульних сховищ: приповерхневе зберігання (а); зберігання на майданчику (б); 1 – автотранспортний засіб для доставки контейнерів з РАВ; 2 – навісне спорудження; 3 – кран-балка; 4 – заповнений контейнерами модуль; 5 – модуль, що заповнюється контейнерами; 6 – контейнер; 7 – інфільтраційний матеріал; 8 – інертний заповнювач; 9 – бетонна подушка; 10 – ґрунтовий шар; 11 – супісок; 12 – суглинок; 13 – глинисті ґрунти; 14 – дренаж; 15 – майданчик модульного сховища

Рівень розробок та їх патентна захищеність дають надію сподіватися на роботи в зазначених напрямках для експорту. Наявність досвіду виробництва подібних елементів для РКТ та функціонуючого обладнання на ДП "Виробниче об'єднання Південний машинобудівний завод ім. О. М. Макарова" без сумніву є достатньою базою для реалізації розробок за даним проектом.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Авдеев О. К., Кретинин А. А., Леденев А. И., Скворцов В. В., Удод В. В., Шахов А. А.** Радиоактивные отходы Украины: состояние, проблемы, решения. – К.: "Друк", 2003. – 400 с.
2. **Отрощенко В.** Контейнер для "ядерного джина". // Ежедневник "2000", 16 декабря 2005 г.
3. **Чернов С.** "Вектор" потребує стабільності. // "Вісник Чорнобиля". – № 12. – 20 березня 2004 р.
4. Закон України "Про поводження з радіоактивними відходами". // Відомості Верховної Ради (ВВР). – 1995. – № 27. – С. 198.
5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Scientific and technical basis for the geological disposal of radioactive wastes. // Technical Report Series. – No. 413. – IAEA, Vienna. – 2003. – 80 p.
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Interim storage of radioactive waste packages. // Technical Report Series – No. 390. – IAEA, Vienna. – 1998. – 90 p.
7. **Шейнич Л.** Специальные бетоны и композиционные материалы. // Капстроительство. – 2002. – № 8. – С. 47–49.
8. **Cunli G., Zhiwen F., Xiuzhen L., Yawen H., Anxi C., Jinsheng Z.** Natural analogue study on backfill materials from ancient Chinese constructions for LILW disposal. // Performance of engineered barrier materials in near surface disposal facilities for radioactive waste. TecDoc-1255. – IAEA, Vienna. – 2001. – P. 30.
9. **Lynkov L. M., Glybin V. P., Soloviev V. V.** Development of barrier composite coating technology for low level radioactive waste disposal. // Performance of engineered barrier materials in near surface disposal facilities for radioactive waste, TECDOC-1255. – IAEA, Vienna. – 2001. – P. 23–24.
10. **Канцедал В. П., Капустин В. Л., Карнаухов И. М. и др.** Газофторидная переработка и минерализация радиоактивных отходов – новые экологически чистые технологии национального научного центра ХФТИ. // Атомная энергетика и промышленность Украины, 1999. – № 2. – С. 17–23.
11. **Андрианов А. Ю., Джур Е. А., Крикун Ю. А., Ткаченко В. И.** Вариант контейнера для хранения среднеэнергетических радиоактивных отходов с использованием ракетно-космических технологий. // Людина і космос, 2005. – Т. 11. – № 1. – С. 43–46.
12. **Baccaro S., Bianchilli B., Casadio C.** Radiation stabilization effects in an ethylene-propylene copolymer and in epoxy resin particulate composites. // Stability and stabilization of polymers under irradiation, TECDOC-1062. – IAEA, Vienna. – 1999. – P. 65–77.
13. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The principles of radioactive waste management. // Safety Series – No. 111-F. – IAEA, Vienna. – 1995. – 24 p.
14. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Optimization of radiation protection in the control of occupational exposure. // Safety Report Series – No. 21. – IAEA, Vienna. – 2002. – 66 p.
15. **Катрашук Г. К., Крикун Ю. О., Ткаченко В. І.** Нові ефекти взаємодії рентгенівського випромінювання з ультрадисперсними середовищами. // УРЖ. – 1995. – № 4. – С. 366–367.
16. **Артемьев В. А.** Оценка ослабления гамма-излучения наноструктурными материалами. // Атомная энергия. – 2002. – Т. 93. – № 2. – С. 120–128.
17. **Артемьев В. А.** Об ослаблении рентгеновского излучения ультрадисперсными средами. // Письма в ЖТФ. – 1997. – Т. 23, № 6. – С. 5–9.
18. **Белоус В. А.** Ионно-плазменная обработка поверхности конструкционных материалов. // Оборудование и инструмент. – 2005. – № 12. – С. 12–16.

Надійшла до редакції 26.04.06