

**Герасимов О.І., Андріанова І.С., Сідлецька Л.М., Співак А.Я.,
Кусятников В.В., Кільян А.М.**

*Одеський державний екологічний університет
E-mail: gerasymovoleg@gmail.com*

Технології радіаційного захисту з використанням гранульованих матеріалів

Технологічні подолання потенційної загрози зниження якості радіаційних монолітних конструкцій захисних екранів, які знаходяться під постійним впливом іонізуючого випромінювання (внаслідок радіаційного окрихчування) є однією з найактуальніших задач забезпечення захисту від радіаційного опромінювання.

Метою роботи є проведення порівняльного аналізу якості (в сенсі радіаційного захисту) монолітних та гранульованих захисних екранів. На відміну від монолітних прототипів гранульована конгломерація має наочні переваги, які полягають в уникненні руйнівних процесів радіаційного окрихчування, спрощенні заміни та маніпулювання (уцілювання та компактизація), а також утилізації. Важливо підкреслити, що захисні властивості гранульованих екранів майже не відрізняються від монолітних аналогів, а економічні переваги відповідних технологій в той же час є суттєвими.

Наданий матеріал є фактично формулюванням задачі про теоретичне обґрунтування переваг використання гранульованих матеріалів (у порівнянні із монолітними) в технологіях радіаційного захисту на підставі аналізу, як фізичних механізмів, і форм-факторів взаємодії нейтронного та гамма випромінювання із речовиною із розвинутою у мікро-масштабі морфологією.

Ключові слова: *радіаційне окрихчування, гранульовані матеріали, іонізуюче випромінювання, технології радіаційного захисту*

Вступ. В сучасному світі у всіх країнах, де використовують ядерну енергетику, найважливішим питанням є утилізація та убезпечення відпрацьованих радіоактивних речовин (як рідких, так і твердих). Методи та матеріали, що використовують для екранування контейнерів та захисту від шкідливих наслідків зберігання відходів є різними. В даній роботі розглянута концепція раціонального використання властивостей гранульованих захисних екранів [1].

Розв'язок питання про поводження з радіоактивними відходами (РАВ) передбачає оцінку різних категорій і методів їх зберігання, а також забезпечення низки вимог щодо захисту навколишнього середовища. Кінцевою метою є ізоляція відходів від біосфери на тривалі періоди часу, забезпечення того, що залишкові радіоактивні речовини, які досягають біосфери, будуть у незначних концентраціях порівняно, наприклад, з природним фоном радіоактивності, а також забезпечення впевненості в тому, що ризик при недбалому втручанні людини буде малим.

Одним з технологічних методів вирішення цієї проблеми є довготривале зберігання РАВ в спеціалізованих модулях, в які поміщують контейнери з відходами. Проте, не дивлячись на високу експертну оцінку, яку дають таким модулям, вони мають ряд недоліків, наприклад, однією з головних проблем є

те, що технологічно передбачено для додаткового захисту використовувати цементні матеріали, якими заповнюють порожній простір, утворений навколо контейнера. У якості заповнювача використовують цементуючі монолітні матеріали. Затверділий монолітний цементний матеріал ліквідує пустоти і створює достатньо надійний захист від дії радіаційного опромінення. Але, в той же час, його використання не є економічно та технологічно привабливим. Так, відомо, що тривала дія радіації призводить до окрихчування монолітного цементного матеріалу [2]. До того ж, деякі критичні стани навколишнього середовища (наприклад: сейсмічна активність) можуть викликати його пошкодження у вигляді формування дефектів, сколів, тріщин чи інших деформацій.

У якості заміни дорого вартісних та громіздких цементних матеріалів ми пропонуємо використовувати мікро-механічні конгломерації (гранульовані матеріали) із маніпулюємими та прогнозуємими властивостями у сенсі задачі радіаційного захисту. Подібні матеріали у достатній кількості представлені та традиційно за відомими існуючими технологіями видобуваються у навколишньому середовищі, при цьому їх власний природний радіаційний фон зазвичай є незначним [3].

1. Радіаційний захист за допомогою монолітного модуля. Найбільшу небезпеку для живих організмів представляють гамма-промені і нейтронне випромінювання. У спорудах захисту від гамма-випромінювання найбільше значення відіграє товщина і маса огороження. Ефективний захист від нейтронного випромінювання досягається, якщо матеріал містить велику кількість водню.

Бетон є ефективним матеріалом для захисту від ядерних випромінювань, оскільки в ньому поєднуються висока густина і вміст певної кількості водню в хімічно зв'язаній воді. Для зменшення товщини захисних екранів атомних електростанцій та підприємств з виробництва ізотопів поряд зі звичайним важким бетоном використовують густі бетони із середньою густиною від 2500 до 7000 кг/м³ і гідратні – з високим вмістом хімічно зв'язаної води.

У якості заповнювачів особливо густих бетонів використовують важкі природні або штучні заповнювачі: магнезитові, гематитові чи лимонитові залізні руди, барит, механічний скрап, свинцевий дріб і ін. Для одержання гідратних бетонів ефективними є матеріали, що мають високу густину і значний вміст хімічно зв'язаної води: лимоніт, серпентиніт і т. ін. [4]. Для покращення захисних властивостей у гідратні бетони вводять добавки, що підвищують вміст водню – карбід, бор, хлористий літій, сульфат кадмію й ін.

Вихідними показниками при підборі складу радіаційно-стійких бетонів є густина бетону, вміст хімічно зв'язаної води, а також міцність і легкість заповнення. Захисний бетон, що використовується для влаштування екранів ядерних реакторів, повинен мати також підвищену термостійкість, високу теплопровідність, низькі значення усадки, коефіцієнта термічного розширення і повзучості.

З метою захисту від радіаційного опромінення законодавчо встановлені максимальні значення допустимих доз опромінення. При використанні бетону для ослаблення впливу небезпечного випромінювання фахівець з радіаційного захисту повинен надати інженеру-бетоняру необхідні параметри для проекту-

Таблиця. Радіаційно-захисні властивості бетону

Випромінювання	Джерела випромінювання (приклади)	Вимоги до якості бетону для захисту від радіації
рентгенівське випромінювання	рентгенівські прилади, лінійний прискорювач	- звичайний бетон з $\rho R \geq 2,4 \text{ кг/дм}^3$ і товщиною близько 300 мм
α - випромінювання β -випромінювання	радіонукліди	- товщина бетону ~ мм
γ -випромінювання	ядерні реактори, радіонукліди, ядерні вибухи	висока щільність і / або - велика товщина
нейтронне випромінювання		- високий вміст хімічно зв'язаної води - добавки у вигляді бору, кадмію або гафнію - висока щільність - велика товщина

вання бетону з урахуванням конструктивних характеристик (наприклад, товщина будівельного елемента): щільність твердого бетону, вміст хімічно зв'язаної води.

Деякі радіаційно-захисні властивості бетону представлені у наданій таблиці.

Хоча модулі для зберігання радіоактивних відходів створюються з монолітного, досить товстого бетону, щоб зробити їх механічно міцними і нечутливими до води, як зазначено вище, може виникнути проблема появи тріщин, окрихчування, тощо. Такі процеси є наслідками створення під впливом постійно діючого опромінення структурних дефектів [2]. Як додатковий бар'єр для іммобілізації радіоактивних відходів всередині модуля використовують цементне затирання. Незважаючи на те, що модуль після цементного затирання потенційно здатний забезпечити зберігання контейнерів радіоактивних відходів протягом тривалого періоду часу, існують реальні умови, які можуть призвести до виникнення тріщин і подальшого витоку небезпечних речовин матеріалів відходів через стінки модулів і таке інше [5].

Ще один недолік, пов'язаний з використанням цементного розчину, – спливання (видавлювання) легких контейнерів під час завантаження в модуль цементного розчину. У цьому випадку, потрібно підштовхувати контейнер назад у внутрішній простір модуля до того, як цементний розчин затвердіє (зазвичай, ця функція потребує участі оператора), так, щоб кришка модуля прилягала належним чином. Це останнє ускладнює процедуру створення модуля.

Існують інші методи зберігання радіаційних відходів у підземному депозитарії, який фіксує матеріали відходів усередині твердого масиву, утвореного шляхом додавання до композиції затвердіваючих рідких розчинів. Однак такі методи практично не дають можливості для видалення (заміни) матеріалу заповнювача, якщо виникає проблема його заміни.

Отже, є потреба у розробленні більш оптимізованої технології упаковки, зберігання та конструкції модуля, які б усували порожній простір, але в той же час дозволяли у разі потреби легко вилучати контейнери з модулів зберігання. Такий модуль мав би включати стійкий бар'єр проти формування тріщин, здатний шляхом спрацювання відповідних фізичних механізмів перешкоджати формуванню потоку рідких відходів, щоб запобігти міграції радіонуклідів у навколишнє середовище.

На цьому шляху можна запропонувати гранульований або порошковий наповнювач, який є вочевидь є вільним від радіаційного окрихчування та забезпечує легку можливість вилучення відходів з модуля зберігання, майже повністю заповнює порожній простір, який виникає між контейнером чи фракцією відходів і модулем, та діє як бар'єр (мембрана), здатний достатньо ефективно блокувати як випромінювання так і дифузійні (міграційні) процеси переносу (наприклад, рідини) [6].

2. Фізичні властивості гранульованих матеріалів. Переваги гранульованого захисного радіаційного екрану над монолітним. Поведінка гранульованих матеріалів при маніпуляціях над ними дійсно виглядає цілком специфічно. Так, наприклад, якщо повільно насипати пісок на підкладку, то пагорб роститиме, зберігаючи конусоподібну форму, поки кут біля основи не досягне деякого критичного значення. Після досягнення цього критичного параметра починається осипання верхніх шарів насипу, яке зовні нагадує лавину. Причому в лавиноподібному русі беруть участь лише частинки, що належать шару деякої товщини, – поблизу поверхні конусоподібного насипу, тоді як інший масив залишається в стані спокою. Дуже багато матеріалів, які оточують нас в повсякденному житті, становлять основу різних галузей індустрії (будівельної, хімічної, фармакологічної, харчової) знаходяться, якраз, в гранульованому стані. Взагалі, серед споживаних і використовуваних людством матеріалів в переважній більшості, на тій або іншій стадії виробництва, обробки, або споживання, вони знаходяться, переважно, або в рідкому, або в гранульованому станах [7].

Таким чином, окрім перспектив ефективного подальшого застосування гранульованих матеріалів, у зв'язку з їх унікальними властивостями, в технологіях, розвиток фундаментальної теорії, яка дозволила б зрозуміти і передбачити особливості їх поведінки, є дуже актуальним завданням сьогодення.

Дуже важливим в поведінці гранульованих матеріалів є власне те, що обумовлює дисипативний характер системи цих матеріалів, і як наслідок – незвичайну їх поведінку, що залежить від природи, форми, розмірів частинок - гранул, а також від середовища, в яке вони поміщені. Всі властивості та поведінка гранульованих матеріалів часто нагадують, так би мовити, статистичні, хоча за своєю природною суттю, гранульований матеріал – механічна система, яка лише зовні показує колективну поведінку, ізоморфну, що вважається, внаслідок своєї нелінійності. Саме цей «колективний характер» поведінки гранульованих матеріалів мають на увазі фахівці, коли вони використовують термін «статистична механіка» гранульованих матеріалів. «Колективна поведінка» гранульо-

ваних матеріалів – це невідмінна характеристика всіх їх властивостей та параметрів [8].

За певних умов, та при певному розташуванні гранул, спостерігається явище спливання фрагменту гранульованого шару, яке використовується для захисту від шкідливих випромінювань. Це явище має абсолютно самостійну та унікальну фізичну природу, відмінну від своїх класичних прототипів. Відмінний шар гранул великої товщини на однорідно збуреній у вертикальному напрямку горизонтальній підкладці покривається сіткою осередків (патернів), що мають специфічну симетрію наприклад – гексагональну та гептогональну, які залежать від умов збудження, товщини шару і типу гранул матеріалу. Вищеназване явище зовні нагадує те, що спостерігається під час тектонічних явищ на поверхні ґрунтів, причому, «рідка» гранульована фаза матеріалу співіснує з «твердою». Описана властивість суміші фаз надає можливість в особливому захисті від постійно діючого випромінювання ізоморфно по відношенню до явища формування та конвективності цього випромінювання. Ця властивість якісно відрізняється від раніш існуючих засобів захисту від випромінювання від відходів ядерної промисловості на базі залізобетонних конструкцій, де явища формування захисту не відбуваються ізоморфно. У бетонних конструкціях під впливом вологи, температури та випромінювання зміни проходять нерівномірно, що призводить до певних деформацій та руйнування конструкцій. Явище ізоморфності зусиль та характеристик, що розповсюджуються в напрямках гранульованих матеріалів дає змогу покращити властивості та ефективність захисних екранів, споруджених для захисту від шкідливих гамма-випромінювань. Всі ці перелічені явища та приклади докладно свідчать про особливу цінність та відмінні властивості гранульованих матеріалів на відміну від раніше застосованих. Гранульовані матеріали дають змогу спроектувати та налагодити впорядковані структури в мезо- і в макро- масштабах, що є одним з важливіших та ключових питань в справі захисту від шкідливих радіовипромінювань.

Головною перевагою використання гранульованих матеріалів для захисту від залишкової радіації є їх здатність до перерозсіювання і поглинання випромінювання та локалізація енергій в широких діапазонах значень. Гранульовані матеріали стійкі до дії радіації та впливу критичних навколишніх станів. Використання «гранульованих екранів» допоможе уникнути проблем пов'язаних з окрихчуванням та іншими деформаціями, які виникають в процесі експлуатації модулів з затверділим цементним матеріалом [9].

Висновки. Сформульована задача про використання гранульованих конгломератів в захисних модулях радіаційного захисту, яка потребує аналізу фізичних процесів, що супроводжують контакти захисних модулів із радіаційним випромінюванням, параметрів гранульованих екранів із урахуванням «пористої» структури мікро-механічної речовини. Попередній аналіз показує, що якісні параметри мікро-механічних систем майже не відрізняються від їхніх суцільних прототипів. З іншого боку, переваги гранульованих систем захисту полягають в уникненні в них ефектів радіаційного окрихчування, та відносній

легкості маніпулювання, транспортування та утилізації, а також, у економічності та можливості дотримання екологічних вимог.

Вищевказане, формулює актуальну задачу по розробці технології використання мікро-механічних (гранульованих матеріалів) в якості компонентів (наповнювачів) радіаційних захисних модулів.

Література:

1. Герасимов О.І. Теоретичні основи технологій захисту навколишнього середовища: навчальний посіб. // Одеськ. держ. екол. ун-т. Одеса: ТЕС, 2018. 228 с.
2. Нотт Дж.Ф. Основы механики разрушения. М.: Металлургия, 1978. 256 с.
3. Герасимов О.І. Фізика гранульованих матеріалів. Монографія. – Одеський державний екологічний університет. Одеса: ТЕС, 2015. 264 с.
4. Худинцев М.М. Методичні вказівки до видання курсових та дипломних робіт для студентів спеціальності екологія та охорона навколишнього середовища. / Одеськ. держ. екол. ун-т. Одеса: 2007 р. 20 с.
5. Герасимов О.І., Сомов М.М. Локальна структура гранульованих матеріалів // Одеськ. держ. екол. ун-т. Одеса: Вісник ОДЕКУ. – 2010. – вип.10. – 304 с.
6. Бялковска Н.Г., Боголюбов В.М. Проблеми поводження з твердими побутовими побутовими відходами в сільській місцевості – м. Київ Національний аграрний Університет, 2011. – 52 с.
7. Урьев Н.Б., Потанин А.А. Текучесть суспензий и порошков. – М.: Химия, 1992. – 323 с.
8. Герасимов О.І., Худинцев М.М., Андріанова І.С., Співак А.Я. Гранульовані матеріали в технологіях утилізації радіаційно шкідливих речовин. // Проблеми та перспективи формування Стратегії поводження з небезпечними відходами в Україні: законодавство, економіка, технології / К.: Центр екологічної освіти та інформації, 2016. С. 40-42
9. Герасимов О.І., Кільян А.М., Андріанова І.С., Курятников В.В., Співак А.Я. Технології дезактивації радіаційних забруднень за допомогою новітніх матеріалів: адсорбція у графенових матрицях. // Матеріали НАЦІОНАЛЬНОГО ФОРУМУ «Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології» (22-23 листопада 2018, м. Київ), 8 с.

**Герасимов О.И., Андрианова И.С., Сидлецкая Л.М., Спивак А.Я.,
Курятников В.В., Кильян А.М.**

Технологии радиационной защиты с использованием гранулированных материалов

АННОТАЦИЯ

Технологические преодоления потенциальной угрозы снижения качества радиационных монолитных конструкций защитных экранов, которые находятся под постоянным воздействием ионизирующего излучения (вследствие радиационного охрупчивания) является одной из самых актуальных задач обеспечения защиты от радиационного облучения.

Целью работы является проведение сравнительного анализа качества (в смысле радиационной защиты) монолитных и гранулированных защитных экранов. В отличие от монолитных прототипов гранулированная конгломерация имеет наглядные преимущества, которые заключаются в избегание разрушительных процессов радиационного охрупчивания, упрощении замены и манипулирования (уплотнение и компактизация), а также утилизации. Важно подчеркнуть, что защитные свойства гранулированных экранов почти не отличаются от монолитных аналогов, а экономические преимущества соответствующих технологий в той же время существенны.

Предоставленный материал фактически формулировкой задачи о теоретическом обосновании преимуществ использования гранулированных материалов (в сравнении с монолитными) в технологиях радиационной защиты на основании анализа, как физических механизмов, и форм-факторов взаимодействия нейтронного и гамма излучения с веществом с развитой в микро-масштабе морфологией.

Ключевые слова: *радиационное охрупчивание, гранулированные материалы, ионизирующее излучение, технологии радиационной защиты*

***Gerasymov O.I., Andrianova I.S., Sidletska L.M., Spivak A.Ya.,
Kuryatnikov V. V., Kilian A. M.***
Radiation protection technologies using granular materials

SUMMARY

Technological overcoming of the potential threat of a decrease in the quality of radiation monolithic structures of protective shields, which are under constant influence of ionizing radiation (due to radiation embitterment) is one of the most urgent tasks of ensuring protection against radiation exposure.

The aim of the work is to carry out a comparative analysis of the quality (in terms of radiation protection) of monolithic and granular protective screens. In contrast to monolithic prototypes, granular conglomeration has clear advantages, which are to avoid destructive processes of radiation embitterment, simplify replacement and handling (compaction and compaction), and disposal. It is important to emphasize that the protective properties of granular screens hardly differ from their monolithic counterparts, and the economic advantages of the corresponding technologies are significant at the same time. The material provided is actually the formulation of the problem on the theoretical substantiation of the advantages of using granular materials (in comparison with monolithic ones) in radiation protection technologies based on analysis as physical mechanisms and form factors of interaction neutron and gamma radiation with a substance with a developed morphology on a micro-scale.

Key words: *radiation embitterment, granular materials, ionizing radiation, radiation protection technologies.*