



## ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ РАДІАЦІЙНИХ ЗАХИСНИХ МОДУЛІВ НА ОСНОВІ МІКРОМЕХАНІЧНИХ (ГРАНУЛЬОВАНИХ) КОНГЛОМЕРАЦІЙ

**О.І. Герасимов, Л.М. Сідлецька**

*Одеський державний екологічний університет*

вул. Львівська, 15, Одеса, 65016, Україна,

**e-mail:** milapolonskaa@gmail.com

Однією з актуальних задач забезпечення захисту від радіаційного опромінення є розробка ефективних технологій конструкцій захисних модулів (екранів), які знаходяться під постійним впливом іонізуючого випромінювання. Надійність монолітних елементів захисту на основі, скажімо, бетонних споруд є обмеженою, внаслідок явища радіаційного охрупчування (radiative embrittlement). З іншого боку саме конгломерації мікромеханічних частинок-гранул є нечутливими до формування дефектів і таким чином охрупчування внаслідок будь-яких, у тому числі радіаційних збуджень. Також, маніпулювання властивостями монолітних модулів можливо лише на етапі їх створення. В той же час такими, наприклад, властивостями гранульованих екранів як густина і компактизація можна маніпулювати зовні навіть в ході їх експлуатації за допомогою зовнішніх полів. Безумовно, що з точки зору поглинальних властивостей важко собі уявити, що вони можуть бути порівняні для пористих і суцільних середовищ. Тим не менше, аналіз багатократного розсіяння гамма-хвиль та інших типів шкідливого випромінювання у системах із наявністю вільного об'єму та складною морфологією у порівнянні із твердим тілом показує вельми наближені характеристики. З урахуванням вищезгаданих обставин і зважаючи на очевидні економічні та технологічні вигоди створення та використання мікромеханічних систем виглядає привабливою і раціональною ідея їхнього використання в технологіях радіаційного захисту [1].

Метою роботи є спроба здійснити порівняльний аналіз ефективності та параметрів радіаційного захисту із використанням монолітних та гранульованих захисних екранів.

З часів відкриття явища радіаційного розпаду та початку його використання у своїй діяльності людство накопичило велику кількість радіоактивних речовин, таких, які ще використовуються, та таких, якими в найближчому майбутньому скористатися буде неможливо і вони мають бути утилізовані. Логічно постає питання їх зберігання (консервації). Як при зберіганні, так і при використанні мають дотримуватися умови, за яких як люди, так і біосфера не зазнають шкоди від іонізуючого випромінювання [2].

Найбільшу небезпеку для живих організмів представляють гамма-промені і нейтронне випромінювання. Для захисту споруд від гамма-випромінювання за допомогою монолітних модулів, параметрами, який найбільш істотно впливає на якість захисту є товщина і маса захисної споруди. Збільшити захисні властивості бетону можна істотно збільшивши його щільність. Ефективний захист від нейтронного випромінювання досягається якщо матеріал містить велику кількість водню (в разі бетону - хімічно зв'язаної води). Бетон є ефективним матеріалом для захисту від ядерних випромінювань, оскільки в ньому поєднуються висока

щільність і вміст певної кількості водню в хімічно зв'язаній воді. Для зменшення товщини (і таким чином витрат на виробництво) захисних екранів атомних електростанцій і підприємств по виробництву ізотопів поряд із звичайним важким використовують особливо важкі бетони з середньою щільністю від 2500 до 7000 кг/м<sup>3</sup> з високим вмістом хімічно зв'язаної води. В якості заповнювачів особливо важких бетонів використовують важкі природні або штучні наповнювачі: магнезитові, гематитові або лимоніт, залізні руди, барит, механічний скрап, свинцевий дріб та ін. Для отримання гідратних бетонів більшу ефективність мають матеріали, з високим вмістом хімічно зв'язаної води: лимоніт, серпентиніт і ін. В якості складених радіаційно стійких бетонів застосовують глиноземисті, що зв'язують при гідратації більшу кількість води. Для поліпшення захисних властивостей в гідрати бетонів вводять добавки, що підвищують вміст водню - карбід, бор, хлористий літій, сульфат кадмію і ін. Вихідними показниками при підборі складу радіаційно стійких бетонів є щільність бетону, вміст хімічно зв'язаної води, а також міцність. Типові параметри таких бетонів наведені в таблиці 1.

**Таблиця 1.**

**Типові параметри важких бетонів**

Вид бетону	Витрата складових, кг/м <sup>3</sup>				Середня щільність бетону, кг/м <sup>3</sup>
	Цемент	Пісок	Щебінь	Вода	
Магнезитовий	389	1365	1765	184	3700
Гематитовий	300	1100	2140	195	3735
Баритовий	395	1352	1800	193	3740
З металевим наповнювачем	395	2637	2637	170	5840

Бетон, який використовується для захисту ядерних реакторів, повинен мати також підвищену термостійкість та високу теплопровідність. Особливо важкі бетонні суміші схильні до розшарування внаслідок різної щільності (неоднорідності) цементного тесту і наповнювачів. Для отримання однорідної суміші і запобігання розшарування на етапі створення рекомендована тривалість перемішування - не менше 2 хвилин, обсяг замісу зменшується пропорційно збільшенню щільності суміші. Такі суміші рекомендується перевозити в автозмішувачах, а також доцільно використовувати пошарове укладання та вібраційне ущільнення [3].

Однією з додаткових проблем є, те що технологічно передбачено використовувати, в якості додаткового захисту, цементні матеріали, якими заповнюють пустий простір утворений навколо контейнера, який застосовується, як модуль зберігання в якості систем для захоронення радіоактивних відходів. В 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 раціональним. Так, відомо, що відомо що, тривала дія радіації призводить до окрихчування монолітного цементного матеріалу (радіаційне окрихчування). Цей процес особливо інтенсивно може протікати саме в неоднорідних і анізотропних середовищах. До того ж, деякі критичні стани навколишнього середовища (наприклад: сейсмічна активність) можуть викликати його пошкодження у

вигляді формування дефектів, сколів, тріщин чи інших деформацій. Також має місце складність маніпулювання в ході експлуатації та заміни відпрацьованого затверділого захисного шару, яка полягає в тому, що в захисний модуль не можна додати чи вийняти ізольовані матеріали без його часткової руйнації чи повного демонтажу [4].

Уявимо тепер, що матеріалом захисного модулю будемо використовувати гранульовані матеріали. Подібні матеріали у достатній кількості представлені та видобуваються у навколишньому середовищі. Природними гранульованими матеріалами, які можуть використовуватися з цією метою можуть бути, наприклад, пісок, бентоніт, гравій, їхні суміші та інші матеріали. Відносна нескладність видобування та поширеність подібних матеріалів робить їх економічно вигідними. Їх фізичні властивості дозволяють гідно конкурувати з цементними матеріалами в якості екранів для захисту від радіації. 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, відміну від своїх класичних прототипів. Відмінний шар гранул великої товщини на однорідно збуреній у вертикальному напрямку горизонтальній підкладинці покривається сіткою осередків (патернів), що мають специфічну симетрію наприклад – гексагональну та гептоганальну, які залежать від умов збудження, товщини шару і типу гранул матеріалу. Вищезазване явище зовні нагадує явище, 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 раніше існуючих засобів захисту від випромінювання від відпрацьованого ядерного палива на базі залізобетонних конструкцій, де явища формування захисту не відбуваються ізоморфно. В цих 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 важливих та ключових питань в справі захисту від шкідливих радіовипромінювань.

Найтипівішими представниками гранульованих матеріалів у природі є пісок, бентоніт та гравій. Пісок – це природний дрібнодисперсний матеріал. Він є одним з найпоширеніших типів будівельних матеріалів. Бентоніт – це природний глинистий матеріал. Він розбухає при взаємодії з водою. Після дії вологи перетворюється в в'язкий матеріал, який більше не пропускає воду. Бентоніт не токсичний. Суміш піску і бентоніту є більш ефективним засобом захисту від іонізуючого випромінювання, ніж використання цих матеріалів окремо один від одного. Вміст бентоніту у суміші може коливатися від 20% до 85%, в залежності від потреб. Їх фізико-хімічні характеристики представлені у таблиці 2.

Таблиця 2.

Основні фізико-механічні властивості сипучих матеріалів

Матеріал	Щільність, т/м <sup>3</sup>	Об'ємна маса в пухкому насипному стані, т/м <sup>3</sup>	Розмір частинок, мм
Цемент	2,8-3,2	0,8-1,2	до 0,09
Пісок	2,5-2,9	1,5-1,7	0,1-1,0
Суша цементно-піщана суміш	-	-	0,02-2,5
Вапняк мелений	2,73	0,9-1,2	0,49
Керамзит	-	0,25-1,0	0,1-2,0

Окрім перспектив ефективного подальшого застосування гранульованих матеріалів, у зв'язку з їх специфічними властивостями, в технологіях радіаційного захисту, розвиток фундаментальної теорії, яка дозволила б зрозуміти і передбачити особливості їх поведінки, є актуальним завданням сьогодення. Дуже важливим в поведінці гранульованих матеріалів є дисипативний характер цих матеріалів, який обумовлює їх незвичайну поведінку (яка суттєво залежить від природи, форми, розмірів частинок - гранул, а також від середовища, в яке вони поміщені та конфайнменту). 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, агрегатним станам конденсованої речовини (як вважається, внаслідок своєї не лінійності). Саме цей «колективний характер» поведінки гранульованих матеріалів мають на увазі фахівці, коли вони використовують термін «статистична механіка» гранульованих матеріалів. «Колективна поведінка» гранульованих матеріалів – це невід'ємна характеристика всіх їх властивостей та параметрів. За певних умов, та при спеціальному розташуванні гранул, спостерігається явище спливання фрагменту гранульованого шару, яке може використовуватися для додаткового захисту від шкідливих випромінювань (ефект Лейденфроста). Це явище має унікальну фізичну природу, відмінну від своїх класичних прототипів. Шар гранул великої товщини на однорідно збуреній у вертикальному напрямку горизонтальній підкладці покривається сіткою осередків (патернів), що мають специфічну симетрію наприклад – гексагональну, які залежать від умов збудження, товщини шару і типу гранул матеріалу [5]. Вищезазначене явище зовні нагадує те, що спостерігається під час тектонічних явищ на поверхні ґрунтів, причому, «рідка» гранульована фаза матеріалу співіснує з «твердою». Зауважимо, що у бетонних конструкціях під впливом вологи, температури та випромінювання структурні зміни проходять нерівномірно, що призводить до їх деформацій та навіть руйнування. Використання гранульованих матеріалів дозволить покращити якісні властивості та ефективність захисних екранів, споруджених для захисту від радіаційних випромінювань. Всі перелічені явища та приклади докладно свідчать про відмінність властивостей гранульованих і монолітних матеріалів. Використання гранульованих матеріалів відкриває перспективи проектування та структурованих у мезо- і в макро- масштабах технологічних модулів радіаційного захисту [6].

Таким чином, гранульовані матеріали, незважаючи на свої очевидні переваги, не можуть ефективно функціонувати в якості універсального захисного екрану. Така можливість

практично створюється на шляху запровадження багатошарової гібридної структури, яка містить чергування металевих і гранульованих шарів для яких перші створюють умови конфайнменту. Незважаючи на те, що монолітні елементи відчують радіаційне охрупчування основу захисної функції в таких сендвич структурах приймають на себе гранульовані компоненти.

Така конструкція дозволить в разі непередбаченої ситуації, на відміну від залитих наглухо цементних модулів, (наприклад, при землетрусі та порушенні цілісності контейнера) відремонтувати його або оперативно замінити пошкоджені бар'єри, тим самим не допустивши подальшого витоку радіоактивних речовин.

Кожен з видів систем захисту, і монолітний, і гранульований має як переваги, так і недоліки. На сьогоднішній час однією з головних переваг монолітних систем радіаційного екранування є відпрацьована, поставлена апробована технологія із орієнтованою на неї інфраструктурою. Будь-які зміни технологічного процесу – це витрати, які мають бути окуплені. Головними перевагами екранів з гранульованих матеріалів економічність, та доступність матеріалів, простота маніпулювання та ефективність використання.

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 під впливом постійно діючого радіаційного опромінення [7].

#### **Література:**

1. Герасимов О.І. Фізика гранульованих матеріалів. Одеса: ТЕС, 2015. 264 с.
2. Герасимов О.І., Загородній А.Г., Сомов М.М. Щодо аналізу структури гранульованих матеріалів. Український фізичний журнал. 2013. Т. 58, № 1. С. 32-39.
3. 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: Збірка матеріалів Національного форуму «Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології» (Київ, 22-23 листопада 2016р.); Центр екологічної освіти та інформації, Київ. С. 40-42.
4. Gerasymov O., Spivak A., Andrianova I., Sidletska L., Kuryatnikov V., Kilian A. Micro-mechanical (granular) mixtures for environmental safety technologies. E3S Web of Conferences. Vol. 234. Article No. 00075.
5. Нотт Дж.Ф. Основы механики разрушения. М.: Металлургия, 1978. 256 с.
6. Герасимов О.І., Андріанова І.С., Кільян А.М. Новітні матеріали в задачах дезактивації: графен у топологічних фазах. // VII-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю (Екологія/Ecology-2019); ВНТУ, Вінниця, Україна. С. 31.
7. Gerasymov O.I., Aliotta F., Vasi C., Chernilevska I.A. Universal micro-particle dynamics in non-uniform electric fields (from liquid to granular jet). // Abstract book. International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2018), dedicated to the 100th Anniversary of the National Academy of Sciences of Ukraine, 27-30 August 2018, Kyiv, Ukraine. P. 514.