

З метою перевірки стійкості програми кількість граничних елементів була подв. Результати комп'ютерного експерименту показали розбіжність в величинах напружень порівнянні з попередньою дискретизацією в межах 4—5 %.

Висновки

1. Здійснено застосування МГЕ до визначення напружено-деформованого стану системи «паль — основа» в лінійній постановці задачі.
2. Проведено алгоритмізацію узагальнювальних співвідношень та здійснено комп'ютерну реалізацію поставленої задачі, виконано числовий експеримент.
3. Результати числового експерименту добре узгоджуються з експериментальними даними, що підтверджує можливість прогнозування опору паль за розробленою програмою.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. П. Бенерджи, Р. Баттерфилд. Методы граничных элементов в прикладных науках. М: Мир, 1984, 494 с.
2. А. І. Моргун. Экспериментальные исследования совместной работы бипирамидальных свай с их основанием. Дис. ... канд. техн. наук. — Одесса, ОИСи, 1976. — 20 с.
3. А. С. Моргун. Застосування методу граничних елементів у розрахунках паль в пластичному середовищі ґрунту. Вінниця: Універсум-Вінниця, 2001. — 70 с.

Рекомендована кафедрою промислового та цивільного будівництва

Надійшла до редакції 8.С
Рекомендована до опублікування 23.С

Моргун Алла Серафимівна — доцент кафедри промислового та цивільного будівництва
Вінницький державний технічний університет

УДК 666.9.015:762

В. Р. Сердюк, д. т. н., проф., О. В. Христич, к. т. н.

СИНГУЛЯРНІ ЕФЕКТИ В РАДІАЦІЙНО-ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЯХ БЕТЕЛУ-М

Забезпечення радіаційної безпеки персоналу, населення і навколишнього середовища є однією з найважливіших проблем, від вирішення якої залежать масштаби практичного використання ядерної енергії в народному господарстві. В загальному комплексі технічних рішень захисту від іонізуючих випромінювань важлива роль відводиться спеціальним матеріалам і конструкціям, здатним послаблювати радіацію.

Світовий досвід будівництва об'єктів ядерної енергетики, сховищ для зберігання радіоактивної сировини та захоронення відходів, будівництва споруд цивільної оборони показує, що найпоширенішого використання серед спеціальних матеріалів для захисту є радіоактивних випромінювань набули бетони. Завдяки можливості використання у складі цих композиційних матеріалів різноманітних наповнювачів, бетони поєднують і оптимізують в собі широкий спектр механічних, фізичних і спеціальних властивостей. На сьогоднішній день для захисних конструкцій ядерних установок розроблена велика кількість видів і складів бетонів [1].

Найефективнішими, з точки зору радіаційного захисту, матеріалами для виготовлення екранувальних конструкцій від нейтронного і фотонного випромінювань є багатошарові металоводні конструкції. Їх виготовляють шляхом розташування у конструкціях наповнених водою пластин сталі або свинцю. Оптимальною концентрацією металу в таких сист-

мах є вміст 65–80 мас %. Недоліком таких спеціальних варіотропних конструкцій є їхня висока вартість

Будівельні бетони, як конструкційного призначення так і спеціальні, можна віднести до одного із різновидів композиційних матеріалів. Для таких штучних будівельних матеріалів однією з характерних особливостей є набування ними якісно нових властивостей у порівнянні з відповідними характеристиками для кожного окремо взятого складового компоненту — так звані синергетичні ефекти. Експлуатаційні характеристики отриманих нових будівельних матеріалів будуть регламентуватись, як кількісними та якісними властивостями складових компонентів, так і варіюванням їхніх рецептурно-технологічних параметрів.

Наповнення матриці-в'язучого — портландцементу дрібнодисперсним металевим наповнювачем і кварцовим піском, забезпечило отримання нового різновиду спеціальних бетонів — бетон електротехнічний металонасичений (бетел-м). Завдяки хорошій адгезії мінерального в'язучого і частинок металевих порошків, наявності в складі композиційного матеріалу підвищеної кількості залізовміщувальних гідросилікатів та інших новоутворень цементного каменю з підвищеним вмістом хімічно зв'язаної води, бетел-м може бути представлений як новий композиційний матеріал з широким діапазоном теплофізичних, фізико-механічних, струмопровідних і радіаційно-захисних властивостей.

У фізичному розумінні бетел-м являє собою синтезовану гетерогенну систему, властивості кожного елементу якої різняться між собою. Так, наприклад, один є діелектричною зв'язкою, а інший — електропровідною складовою матеріалу. Завдяки рівномірному розподілу дрібнодисперсного металевих наповнювача в структурі композиту отриманий матеріал з великими поверхнями розподілу фаз є на мікроскопічному рівні аналогією багаточастинкових металоводних екранів. Взаємопов'язування в структурі дрібнозернистого металонасиченого бетону штучно синтезованих новоутворень (продукти гідратації мінерального в'язучого і окисленого металевих наповнювача), які містять підвищений вміст води у вигляді хімічно-зв'язаної води і важких елементів (металу), забезпечуватимуть набування бетелом-м проміжних радіаційно-захисних властивостей поміж металевими і звичайними бетонними екранами [2–3].

Для дослідження впливу рецептурно-технологічних параметрів виготовлення зразків бетелу-м на їхні радіаційно-захисні властивості, використовували плитки-моделі екранів товщиною від 10 до 70 мм різного компонентного складу. Значення кількісних характеристик процесів послаблення іонізуючих випромінювань визначались в лабораторії радіаційної гігієни Українського наукового гігієнічного центру (м. Київ). Екранувальні властивості зразків (лінійний і масовий коефіцієнти послаблення, товщина шару половинного послаблення випромінювань та коефіцієнт масового захисту) звичайного і металонасиченого дрібно-зернистих бетонів досліджувались в умовах геометрії вузького пучка (детектор, розташований за екраном, реєструє лише нерозсіяне випромінювання, спрямоване коліматором). Як джерела іонізуючих випромінювань, використовувались природні радіонукліди (таблиця). Вимірювання інтенсивності потоку проникної радіації визначались за кількістю імпульсів в пікові повного поглинання.

Характеристика природних джерел іонізуючих випромінювань

Радіонуклід	Am ²⁴¹	Eu ¹⁵²	Eu ¹⁵²	Na ²²	Cs ¹³⁷	Eu ¹⁵²	Eu ¹⁵²	Eu ¹⁵²	Co ⁶⁰	Na ²²	Co ⁶⁰
E _γ , кеВ	60	121	344	511	661	778,9	964	1112	1170	1270	1320

Як обладнання використовувались: детектор з надчистого германію модифікації 7229 p; аналізатор імпульсів Canberra — 35PLUS (виробництва США) свідоцтво перевірки № 301572 і гамма — спектрометр з багатоканальним аналізатором «VARRO» SILENA № 265 із напівпровідниковим детектором PRGC 3020 № P140 (свідоцтво № 05/98 від 20.03.98).

В результаті проведених досліджень встановлено загальну закономірність зміни радіаційно-захисних властивостей зразків в залежності від їх компонентного складу і фізичних характеристик, яка підпорядковується класичному закону Бугера-Ламберта. Так, в цілому для усіх енергій гамма-випромінювань зміна вмісту металевих наповнювача від 6 до

Кож

Баб

Фі.

Ру.

Во

Ос

Д.

Р

І

80 мас %, призводить до зменшення товщини екрану у 1,1...2,2 рази. Використання механічних впливів (вібропресування) під час формування зразків забезпечує підвищення середньої густини композиційного матеріалу на 18...36 %, що відповідно і відображається на його екрануючих характеристиках. Для металонасичених зразків простежується зменшення товщини захисту в середньому у 2,6 раз зі збільшенням середньої густини зразків від 1800 до 2760 кг/м³. При цьому також слід відмітити, що у вказаних рецептурно-технологічних параметрах змінюється питомий опір зразків бетелу-м в межах від 10⁴ до 10¹ Ом·м.

Отримані результати експериментальних досліджень підтверджують обґрунтовану гіпотезу стосовно набування звичайними дрібнозернистими бетонами підвищених радіаційно-захисних властивостей зі зміною їхніх рецептурно-технологічних параметрів і набування ними струмопровідності за умови сталої середньої густини зразків. Так як фізична природа та механізми взаємодії з елементами речовини захисного екрану гамма- і рентгєнівського випромінювань однакові, то у визначених енергетичних спектрах таких побічно-іонізуючих випромінювань отриманий електротехнічний бетон може бути впроваджений як альтернатива традиційним дорогим спеціальним матеріалам під час будівництва рентген-кабінетів.

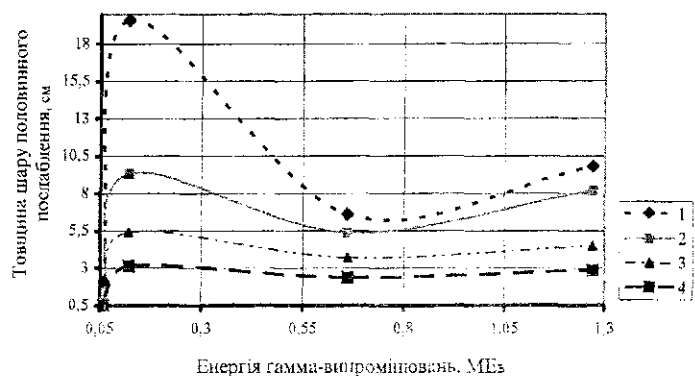


Рис. 1. Вплив енергії гамма-випромінювань на товщину зразків-моделей захисту: 1 - контрольні цементно-піщані; 2 - з піброуцільненого бетелу-м (вміст металевих наповнювача 36-42 мас %); 3 - з пресованого бетелу-м (теж 56-64 мас %); 4 - з вібропресованого бетелу-м (теж 68-76 мас %)

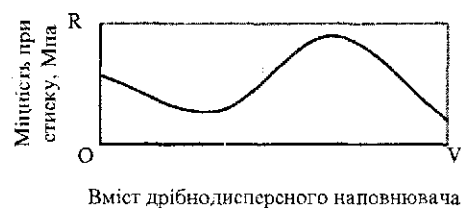


Рис. 2. Узагальнений хвилеподібний характер залежності міцності дисперснонаповнених композиційних матеріалів від концентрації наповнювача

Для дисперсно-наповнених композиційних матеріалів (полімери, кераміка, вироби на основі мінеральних в'язучих) залежність міцності від об'ємної концентрації частинок заповнювачів в їхньому складі також носить дещо аналогічний характер і представлена у вигляді хвилеподібного графіка з чітко вираженими максимумами і мінімумами (рис. 2) [4, 5].

Такі хвилеподібні зміни механічних властивостей композиційних матеріалів мають адитивний характер, не підпорядковуються жодному з математичних законів і називаються ефектами сингулярності [4, 5].

Графік, зображений на рис. 2, доцільно розглянути топологічно-диференційовано з урахуванням інтервалів наповнення матриці-в'язучого. З однієї

Разом з тим, узагальнюючи отримані результати досліджень кількісних радіаційно-захисних характеристик зразків звичайного і металонасиченого бетонів у спектрі енергій гамма-випромінювань 60, 121, 661 і 1270 кеВ, виявлені дещо аналогічні явища зміни екранувальної здатності композиційних матеріалів. Графічна інтерпретація впливу рецептурно-технологічних параметрів на товщину захисного матеріалу зображена на рис. 1.

Для дисперсно-наповнених композиційних матеріалів (полімери, кераміка, вироби на основі мінеральних в'язучих) залежність міцності від об'ємної концентрації частинок заповнювачів в їхньому складі також носить дещо аналогічний характер і представлена у вигляді хвилеподібного графіка з чітко вираженими максимумами і мінімумами (рис. 2) [4, 5].

Такі хвилеподібні зміни механічних властивостей композиційних матеріалів мають адитивний характер, не підпорядковуються жодному з математичних законів і називаються ефектами сингулярності [4, 5].

Графік, зображений на рис. 2, доцільно розглянути топологічно-диференційовано з урахуванням інтервалів наповнення матриці-в'язучого. З однієї

Тобто при дефіциті зв'язуючого матричного матеріалу створюються групи частинок, які не змочені в'язуючим і взаємодіють між собою виключно за рахунок безпосереднього контакту по ювенільним ділянцям їхніх поверхонь. Такі «сухі» агрегатовані новоутворення частинок капсулюються в матриці і по суті є псевдопорами, які зменшують міц-

ність. Вірогідність створення агрегатів, або аналогічних новоутворень залежить від частоти взаємодії частинок наповнювача шляхом прямого контакту.

Показані на рис. 1 узагальнені результати досліджень радіаційно-захисних властивостей дрібнозернистих бетонів різного компонентного складу в діапазоні енергій гамма-випромінювань від 60 до 1270 кеВ також носять сингулярний характер. Такі хвилеподібні ефекти зміни товщини шару половинного послаблення енергії гамма-квантів в товщині матеріалу зразка можна пояснити перш за все особливостями формування мікро і макроструктури цементного каменю з його насиченням дисперсним окисленим металевим порошком.

Крім того необхідно також враховувати якісні процеси взаємодії іонізуювальних випромінювань різних енергій γ -квантів з елементами речовини екрану. Так під час взаємодії фотонного випромінювання з енергією до 500 кеВ в товщині матеріалу для елементів з великими Z основним процесом є фотоелектричне поглинання (передача енергії електронам). Для елементів речовини з великими і середніми порядковими номерами некогерентне (комptonівське) розсіювання виразно проявляється в діапазоні енергій від 0,5 до 10 МеВ. Ймовірність розсіювання зі збільшенням E_γ зростає пропорційно щільності речовини. Утворення електронно-позитронних пар розпочинається з енергією гамма-випромінювання $E_\gamma \geq 1,022$ МеВ. Тобто коли E_γ рівна або більша за суму енергії взаємопов'язаної з масою спокою електрона і позитрона. Даний процес має місце під час взаємодії γ -квантів з електричним полем ядра атома. Ймовірність таких взаємодій зростає зі збільшенням E_γ пропорційно Z^2 поглинального матеріалу [6].

За рахунок таких взаємодій радіаційно-захисні властивості матеріалу, лінійний коефіцієнт послаблення дорівнює сумі лінійних коефіцієнтів, що характеризують кожний процес окремо (1).

$$\mu = \tau + \sigma + \chi, \quad (1)$$

де μ — лінійний коефіцієнт фотоелектричного поглинання; σ — лінійний коефіцієнт, що характеризує комpton-ефект; χ — лінійний коефіцієнт поглинання в процесі утворення пар.

Таким чином, ймовірність впливу того чи іншого процесу взаємодії на величину повного лінійного коефіцієнта послаблення іонізуючого випромінювання залежить від значення енергії γ -випромінювання і виду поглинаючого елемента. Внаслідок збільшення енергії і зменшення довжини хвилі, проникна здатність фотонного випромінювання збільшується.

В практиці радіаційного захисту часто використовуються композиційні матеріали, до складу яких входять різноманітні елементи, тому для речовин різного хімічного складу значення масового коефіцієнта може розраховуватись за формулою 2.

$$\mu_m = \mu_{m1}P_1 + \mu_{m2}P_2 + \mu_{m3}P_3 + \dots + \mu_{mn}P_n, \quad (2)$$

де P — кількість елемента в відносних одиницях маси матеріалу.

Для композиційних матеріалів, до складу яких входять елементи з малими і середніми атомними номерами, для певних енергій гамма-квантів проявляються різні механізми взаємодії випромінювань з елементами речовини поглинального матеріалу. Згідно довідникових даних для елементів з атомними номерами від 4 до 20 в діапазоні енергій гамма-випромінювань до 80 кеВ переважним процесом взаємодії є фотоелектричне поглинання, від 80 до 600 кеВ — комptonівське (некогерентне) розсіювання і від 550 та вище — утворення електронно-позитронних пар [6].

Поясненням виявлених сингулярних ефектів в результатах експериментальних досліджень є перш за все різні механізми процесів взаємодії гамма-квантів з композиційним матеріалом захисного екрану в залежності від енергії випромінювань і вмісту дрібнодисперсного металевих наповнювача. Якісні характеристики процесів взаємодії будуть проявлятися кожний по своєму, а кількісною мірою таких процесів є ефективний порядковий номер ($Z_{\text{еф}}$) полікомпонентного композиційного матеріалу. Для зразків бетону-м отримані розрахункові середні значення $Z_{\text{еф}}$ в залежності від рецептурних параметрів виготовлення моделей захисту знаходяться в межах від 14,5 до 18,8.

По-друге, втрати енергії гамма-випромінювань при взаємодії з бетоном-м пояснюються їхньою квантово-дуалістичною природою. Тобто, якщо розглядати випромінювання як потік псевдочастинок, то поглинання їхньої енергії в товщині металоенасиченого бетону

пояснюється багаторазовими відбиваннями, розсіюванням і поглинанням квантів металом – штучне подовження траєкторії проникнення. З іншої сторони, якщо розглядати електромагнітне випромінювання як хвилі, то поглинання (згасання) їх в об'ємній струмопровідній матриці бетеду-м відбуватиметься збудженням електромагнітним полем протидії за рахунок омичних втрат.

Наявність в складі нового композиційного матеріалу дрібнодисперсного металевго наповнювача, створення в його структурі залізовміщувальних гідросилікатів і об'ємної струмопровідної матриці, а також варіювання енергетичних спектрів гамма-випромінювань в певній мірі накладаються на ефекти сингулярності, виявлені в результатах експериментальних досліджень радіаційно-екрануючих властивостей зразків бетеду-м. Виявлення таких ефектів в подальшому дозволить покращити ефективність радіаційного захисту та скоротити кошторисні витрати на його будівництво.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дубровский В. Б., Аблевич З. Строительные материалы и конструкции защиты от ионизирующих излучений. Совместное издание СССР — ПНР / Под ред. В. Б. Дубровского. — М.: Стройиздат, 1983. — 240 с.
2. Сердюк В. Р., Лемешев М. С., Христич О. В. Фізико-хімічні особливості формування структури електропровідних бетонів // Вісник ВПІ. — 1997. — № 2. — С. 5—9.
3. Христич О. В., Лемешев М. С. Формування мікроструктури бетонів для захисту від іонізуючого випромінювання // Вісник ВПІ. — 1998. — № 2. — С. 18—23.
4. Соломатов В. И., Бобрышев А. Н. Структурообразование и технология полимерных композиционных материалов // Полимерные композиционные материалы в строительстве. — М.: Стройиздат, 1988. — С. 5—167.
5. Ленг Ф. Ф. Разрушение композитов с дисперсными частицами в хрупкой матрице // Композиционные материалы. Разрушение и усталость. — Т. 5. — М.: Мир, 1978. — С. 11—57.
6. Гусев Н. Г., Машкович В. П., Суворов А. П. Защита от ионизирующих излучений. Т. 1. Физические основы защиты от излучений / Под общей редакцией Н. Г. Гусева. — М.: Атомиздат, 1980. — 461 с.

Рекомендована кафедрою менеджменту організацій

Надійшла до редакції 29.08.02
Рекомендована до опублікування 19.12.02

Сердюк Василь Романович. — завідувач кафедри, **Христич Олександр Володимирович** — старший викладач.

Кафедра менеджменту організацій, Вінницький державний технічний університет