

DOI: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2020-1-20-29>

УДК 691 + 699.88

О. В. Христинч, к. т. н., доц.; М. С. Лемешев, к. т. н., доц.; Д. В. Черпаха

## ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ВИГОТОВЛЕННЯ РАДІАЦІЙНОЗАХИСНОГО БЕТОНУ

Представлено матеріали досліджень, які підтверджують, що будівництво XXI ст. потребує застосування ефективних, доступних за ціною, будівельних матеріалів спеціального призначення для захисту від небезпечних екологічних чинників. Розглянуто методи проектування складів бетонів і технології виготовлення будівельних матеріалів спеціального призначення. Зазначена актуальність дослідження проблем, пов'язаних із необхідністю розробки важких бетонів, здатних екранувати проникаючі радіоактивні випромінювання. Проаналізовано наявні напрацювання в галузі будівельного матеріалознавства й виокремлено особливості технологічних параметрів отримання бетонів спеціального призначення на основі мінеральних в'язучих. Зазначено, що використання різних за фізико-хімічними характеристиками заповнювачів бетонів на основі мінеральних в'язучих, дозволяє отримати композиційний матеріал із широким спектром експлуатаційних властивостей. Експериментальними дослідженнями доведено можливість регулювання конструкційно-технічних і електрофізичних властивостей дрібнозернистих бетонів із використанням дрібнодисперсних металевих заповнювачів, отриманих із відходів металообробних виробництв. Закцентовано увагу на можливості регулювання технологічних параметрів металонасичених бетонів для отримання композиційного матеріалу з радіаційнозахисними властивостями. Досліджено, що під час додавання дисперсного металевого заповнювача до 35 % мас у складі литих сумішей відбувається мікроуцільнення структури і при цьому спостерігають зростання водопотреб формувального розчину. За використання технології механічного уцільнення структури дисперсно-наповнених виробів отримано зразки-моделі радіаційнозахисного покриття із середньою густиною до  $2910 \text{ кг/м}^3$ . Застосування технології штучного синтезу матричної металонасиченої щільної структури дисперснонаповненого конгломерату з великою площею внутрішніх поверхонь розділу фаз забезпечить виробам зі спеціального бетону набуття здатності послаблювати потоки проникаючих йонізуючих випромінювань у тілі бар'єрного екрана. Обґрунтовано можливість регулювання радіаційнозахисних властивостей бетонів шляхом зміни рецептурно-технологічних параметрів виготовлення композиційного матеріалу. Показано, що завдяки фізико-хімічним процесам формування дисперснонаповнених структур у тілі дрібнозернистого металонасиченого бетону створена об'ємна електропровідна матриця, кожний складник якої відрізняється за своїми електрофізичними властивостями. Оскільки йонізуючим електромагнітним випромінюванням згідно із законами квантової фізики водночас притаманні хвильові та корпускулярні властивості, поглинання проникаючих радіоактивних випромінювань у структурі матеріалу відбувається за рахунок багаторазових відбивань і розсіювань потоку випромінювань поверхнею металу, а також інтенсивність електромагнітних хвиль послаблюватиметься збудженням у об'ємі електропровідної матриці полем протидії. Регулювання рецептурно-технологічних параметрів дрібнозернистого бетону шляхом наповнення матричних мінеральних структур реакційно здатним металевим порошком і утворення при цьому залізовмісних гідросилікатів із підвищеним умістом хімічно зв'язаної води ототожнюватиме отриманий композиційний матеріал зі спеціальними багатошаровими метало-водяними екранами.

**Ключові слова:** бетон, радіаційнозахисні властивості, дрібнозернистий бетон, рецептурно-технологічні параметри, мінеральна матриця, металонасичений композиційний матеріал.

### Вступ

Системи інженерно-технічних рішень щодо створення належних санітарно-гігієнічних умов під час експлуатації ядерних енергетичних установок передбачає улаштування

бар'єрного захисту у вигляді радіаційнопоглинальних покриттів і спеціальних екранів. Метою радіаційного захисту є запобігання соматичних і зведення до мінімуму соматико-стохастичних генетичних наслідків, зумовлених шкідливим впливом зовнішнього і внутрішнього радіаційного опромінення як окремих працівників, так і населення загалом під час використання, зберігання й транспортування радіоактивних речовин, експлуатації ядерних реакторів, рентгенівських апаратів та інших джерел радіації.

Світовий досвід показує, що під час спорудження об'єктів ядерної енергетики, сховищ для зберігання радіоактивної сировини та захоронення радіоактивних відходів, будівництва об'єктів цивільної оборони найбільш поширеного застосування в будівельній практиці набули бетони. Під час будівництва ядерних установок, сховищ, контейнерів для радіоактивних відходів у вітчизняній і зарубіжній практиці широкого застосування набули звичайні бетони. Такий матеріал складається з елементів із малими й середніми атомними масами (друга група), які використовують для екранування безпосередньо й побічно йонізуювальних випромінювань. В окремих випадках влаштування біологічного захисту з використанням цементних бетонів за умови збільшення товщини захисного екрана є ефективнішим ніж металеві- і свинцево-водяні конструкції [1 – 4].

Значної популярності, порівняно з іншими будівельними матеріалами, цементні бетони набули завдяки високим конструктивним властивостям, легкості надання виробу або конструкції потрібної форми, дешевизні й доступності місцевих матеріалів, можливості змінювати спеціальні властивості шляхом підбору складу наповнювачів.

Можливість експлуатації важких бетонів як будівельних композиційних матеріалів біологічного захисту забезпечується завдяки доступності технології регулювання компонентного складу сировинної суміші, яка дозволяє використовувати основними компонентами традиційні в'язучі системи. Регулювання радіаційнозахисних властивостей здійснюється за рахунок використання спеціальних заповнювачів, здатних вступати у фізико-хімічні взаємодії з в'язучим у складі формувальних спеціалізованих будівельних сумішей [5 – 7]. Використання у складі бетону хімічних елементів з різними порядковими номерами дозволяє оптимізувати й взаємопов'язувати механічні, фізичні й спеціальні захисні властивості від йонізуювального випромінювання [8 – 9].

**Мета досліджень** – розробити рецептурно-технологічні параметри виготовлення дрібнозернистих бетонів із підвищеними радіаційно екранувальними властивостями.

### Основна частина

Використання в якості важкого заповнювача бетону дрібнодисперсного металевого порошку (відходи металообробних виробництв) стало результатом отримання нового різновиду бетонів на основі мінеральних в'язучих – бетону електропровідного металонасиченого. На думку дослідників мікроструктурних процесів формування дисперснонаповнених мінеральних матричних структур, отриманий композиційний матеріал представляє складну взаємопроникну гетерогенну систему, властивості кожного елемента якої різняться між собою. Затверділі новоутворення в'язучої системи є діелектричною матрицею, а реакційноздатний металевий порошок є електропровідним складником матеріалу. Унаслідок рівномірного розподілу частинок металу в масиві матриці створюється структура цементного каменю, яка є аналогією цементним бетонам із мінеральними дисперсними домішками. Наявність покращеної адгезії між частинками важкого електропровідного наповнювача й в'язучими компонентами суміші, суміщення лінійних деформацій цементного каменю й металу, широкий діапазон електричного опору стали результатом отримання композиційного матеріалу з широким діапазоном конструктивних і фізико-механічних властивостей із підвищеною тепловіддачею.

Штучний синтез щільної структури дисперснонаповненого конгломерату з великою площею внутрішніх поверхонь розподілу фаз також відобразиться на послабленні проникаючих потоків йонізуювальних випромінювань у структурі екрануючого матеріалу. Оскільки в структурі металонасиченого дрібнозернистого бетону створена об'ємна електропровідна матриця, а фотонним електромагнітним випромінюванням згідно із законами квантової фізики водночас притаманні хвильові та корпускулярні властивості, то поглинання радіоактивного випромінювання в структурі матеріалу відбуватиметься збудженням в об'ємі електропровідної матриці полем протидії й за рахунок багаторазових відбивань і розсіювань потоку випромінювань поверхнею дисперсного металевго наповнювача. Насиченість цементного в'язучого металевим порошком і утворення при цьому залізовмісних гідросилікатів із підвищеним умістом хімічно зв'язаної води наближуватиме отриманий бетон за спеціальними властивостями до багат шарових метало-водяних екранів [10].

Унаслідок дії на матеріали радіаційнозахисних екранів йонізуювальних випромінювань у них відбуваються структурні й хімічні зміни, які супроводжуються зниженням фізико-механічних властивостей [11]. Величина таких змін залежить від виду матеріалу й компонентного та енергетичного складу випромінювання, тому за високої інтенсивності випромінювань і значної тривалості їхньої дії перед проєктувальниками постає проблема розробки радіаційностійких бетонів.

Додавання до складу бетону сталених заповнювачів призводить до покращання його радіаційнозахисних і фізико-механічних властивостей. Це залежить від виду його геометричних форм, вмісту заповнювачів та хімічного складу. Так механічні властивості бетонів на сталевому ломі погіршені, порівняно із звичайним бетоном, хоча без особливих ускладнень можна отримати матеріал з об'ємною вагою 5,4 т/м<sup>3</sup>. У роботі [13] показано, що використання відходів від подрібнення крупного заповнювача й чавунного дробу, як мілкого заповнювача, дозволяє отримати щільність 6,8 т/м<sup>3</sup>.

У роботах [14 – 17] авторами запропоновано використання відходів металообробки (металеві шлами) для отримання нового різновиду бетонів із поліфункціональними властивостями. Дрібнодисперсні шлами сталі ШХ–15 отримані в результаті складного технологічного процесу виробництва кульок на підшипникових заводах. Складниками процесу є холодне штампування, швидкісне механічне обпилювання (обдирання), обкатка (шліфівка карбідними зернами), закалювання, відпуск, тверде шліфування, доведення й поліровка. Під час виробництва використовують вологе шламовідведення відходів турбулентним потоком змащувально-охолоджувальної рідини. Характеристики порошоків шламів залежать від процесу виробництва, технологічні особливості операцій кожного з яких впливають на механічні властивості порошоків шламів та їхні розміри (табл. 1) [18].

Таблиця 1

Характеристики шламів відходів сталі ШХ–15

Складники змащувально-охолоджувальної рідини для технологічних операцій металообробки	C <sub>Fe</sub> , %		d×10 <sup>3</sup> , кг/м <sup>3</sup>	5×10 <sup>3</sup> , м <sup>2</sup> /кг	Γ <sub>max</sub> ×10 <sup>-6</sup> , м
	вихідний метал	порошок			
1. Обкатка кульок					
Емульсія на таловій оліві, сода, нітрит натрію.	60,1	90,5	5,9	0,7	45,0
2. Шліфування кульок					
Дизельне пальне, стеарин	75,0	83,7	4,5	1,0	7,5
Вода, тріетаноламін, нітрит натрію	29,4	85,4	5,0	1,5	10,0
Вода, сода, нітрит натрію	54,0	89,5	6,7	2,0	15,0
Вода, сода, нітрит натрію, фосфат	80,5	95,4	7,2	0,5	27,0

натрію					
3. Шліфування жолоба					
Емульсія НГЛ–205, триетаноламін, олеїнова кислота	23,0	66,0	4,2	0,6	35,0

Залежно від способу збереження відходів вони можуть бути різними за вмістом оксидних вкраплень. Так металеві порошки, які використовують безпосередньо зі спеціальних ємностей-відстійників, куди їх відводять потоком охолоджувальної рідини під час виробничих операцій, характеризуються незначним ступенем окислення. Коли використовують металеві відходи з відвалів (збереження на відкритому повітрі), то для таких заповнювачів характерні значні включення окислів металів, які утворюються в процесі тривалого часу зберігання. Загальним для обох видів є залишки змащувально-охолоджувальних рідин на поверхні частинок металевих порошків.

Для використання металевих відходів як заповнювачів бетонів необхідно додатково застосовувати технологію доочищення, яка може реалізовуватися за двома операційними процесами: відпалювання без доступу кисню за  $+ 500 \div 700^{\circ}\text{C}$  або відмивання залишків охолоджувальних рідин у водяних розчинах лугів. Металеві порошки (відходи сталі ШХ-15) для використання як заповнювачів бетону на основі мінеральних в'язучих для виготовлення радіаційнозахисних екранів доцільно використовувати з відкритих відвалів, тобто з окисленими поверхнями металу. Високий вміст кисню на поверхні окисленого шару порошків металу під час контакту з в'язучим може призводити до утворення підвищеного вмісту хімічнозв'язаної води [19].

Основними технологічними параметрами, які в подальшому впливатимуть на фізико-механічні та експлуатаційні властивості нового різновиду цементних бетонів із металевим дрібнодисперсним заповнювачем будуть показники кількісного співвідношення компонентів сировинної суміші. Серед них основними є витрати води, в'язучого, домішок і вміст металевого порошку. Зазначені рецептурно-технологічні параметри тією чи іншою мірою відобразяться на фізико-механічних і реологічних параметрах формувальних розчинів: рухливості суміші конгломерату, об'ємній вазі й міцності дослідних зразків, технологічних режимів тверднення виробів.

З урахуванням радіаційнозахисних властивостей металонасиченого бетону, головним функціональним компонентом є дрібнодисперсний наповнювач, що являє собою металевий порошок у вигляді пластинчатих і лузгоподібних частинок із середнім розміром 0,02 мм. Унаслідок такої форми відвальних відходів металообробних виробництв пустотність металевих шламів сягає 75%.. У дослідженнях використовували метал, очищений від залишків змащувально-охолоджувальної рідини шляхом промивання в лужному розчині за температури  $+50^{\circ}\text{C}$ . Істинна густина висушеного порошку дорівнює  $6,76 \text{ г/см}^3$ , а насипна щільність –  $1,31 \text{ г/см}^3$ . У роботі [20] авторами встановлено, що після вібрування протягом 3 – 4 хвилин насипна густина очищеного порошку збільшується до  $2,76 \text{ г/см}^3$ .

Критерієм щільності бетону є взаємопроникність компонентів в'язучого й дисперсного заповнювача, яка залежить від кількості й характеру пор сформованих структур. Основними різновидами пор у дрібнозернистому металонасиченому бетоні будуть пустоти й пори в матричному тілі цементного каменю та матеріалі загалом, які утворились у результаті перемішування й укладання суміші. Дрібні пори й капіляри ( $1 \div 50 \text{ мк.}$ ) будуть сформовані між зернами цементного каменю та заповнювача, утворених унаслідок випаровування структурної і порової нестабільно зв'язаної води новоутворень. Також можна віднести до різновиду нещільностей мікропори ( $5 \div 20 \text{ мк.}$ ) гідратованих оболонки гелю, які виникли внаслідок контракційних явищ під час гідратації мінерального в'язучого. У дрібнозернистому металонасиченому бетоні пористість також зумовлюється формою

частинок металевого дрібнодисперсного наповнювача, агрегуванням їх у флокули за наявності води [21 – 22].

Дослідження впливу рецептурно-технологічних параметрів на властивості формувальних розчинів проводили для метало-цементних сумішей і для розчинів із додаванням дрібного заповнювача. Дрібнозернистий металонасичений композиційний матеріал слід розглядати як бетон із мікронаповнювачем. У цьому випадку металевий порошок і мінеральне в'язуче можемо розглядати як єдине ціле – метало-цементну пасту. Активність цементу і його вплив на вміст води в складі суміші залежатимуть від вмісту і властивостей дисперсного важкого наповнювача. Порошки сталі ШХ-15 завдяки великій питомій поверхні ( $S_{\text{пит}} = (0,5-2) \times 10^3 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) і властивій йому високій гідрофільності збільшує водопотреби суміші (рис. 1). Унаслідок цього зростає пористість матеріалу за рахунок надлишкової води, яка не бере участі в гідратації мінерального в'язучого.

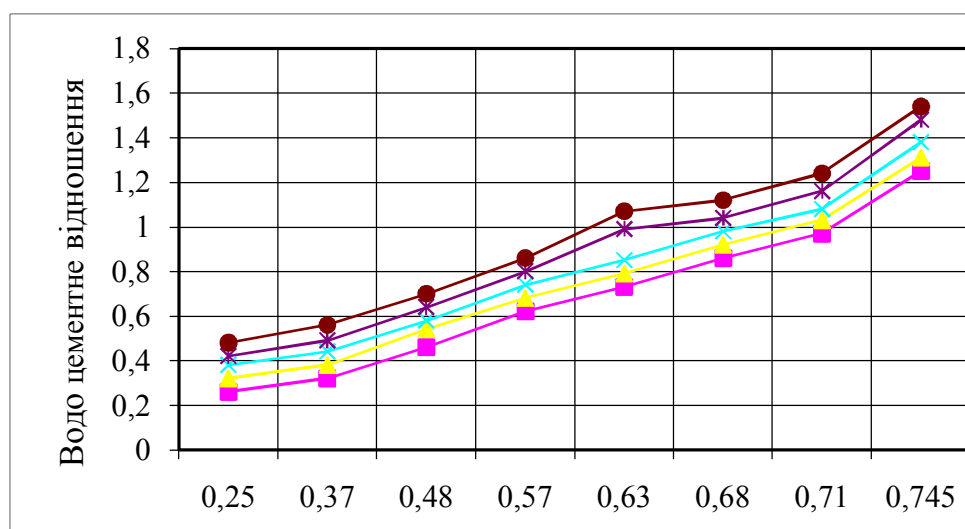


Рис. 1. Уплив вмісту металевого наповнювача на водопотреби зразків суміші: 1 – розплив малого конуса на струшувальному столику 101 – 108 мм; 2 – те ж 112 – 122 мм; 3 – те ж 126 – 133 мм; 4 – те ж 144 – 149 мм; 5 – те ж 158 – 169 мм

Із наведених на рис. 1 матеріалів графічної інтерпретації результатів експериментальних досліджень спостерігаємо, що із зростанням у складі суміші концентрації металевого мікронаповнювача збільшуються водопотреби формувальних розчинів за визначених меж реологічних параметрів зразків дрібнозернистого бетону. Прослідковуємо вплив на рухливість дослідних зразків металонасичених сумішей кількісного співвідношення компонентів за заданих значень показників водотвердого відношення. Технологія виготовлення екранувального покриття з литих металонасичених сумішей призведе до отримання виробів із високими показниками пористості структури, що в подальшому негативно відобразатиметься на радіаційнозахисних властивостях матеріалу.

Результати експериментальних досліджень фізико-механічних характеристик металонасичених зразків, виготовлених за технологією штукатурних покриттів, свідчать, що по-різному на показник середньої густини зразків впливає кількість металевого порошку в складі композиційного матеріалу (рис. 2). Із насиченням цементного каменю дисперсним металом щільність зразків збільшується від 1,73 до 2,04 г/см<sup>3</sup>. Питомий вміст металевого наповнювача перебуває в межах від 0 до 36% мас. Далі із збільшенням вмісту мікронаповнювача в структурі цементного каменю показник середньої густини зразків поступово зменшується й дорівнює 1.62 г/см<sup>3</sup> за концентрації важкого наповнювача 80%

мас. Це пояснюється високою пористістю порошків сталі ШХ-15 і відповідно значними водопотребами розчину для заданої рухливості.

Додавання діелектричного заповнювача до складу формувальних розчинів, виготовлених за технологією штукатурних сумішей мінерального заповнювача – кварцового піску, призводить до зростання показників середньої густини структури зразків із збільшенням кількості металевого порошку до 30% (рис. 2). Через те, що пористість піску в середньому складає 36%, цілком очевидним є факт, що збільшення кількості метало-цементної пасти призводить до розсування частинок діелектричного наповнювача й зростання пористості матеріалу. Подальше збільшення концентрації металу до 50% призводить до зменшення щільності зразків до 1,8 г/см<sup>3</sup>.

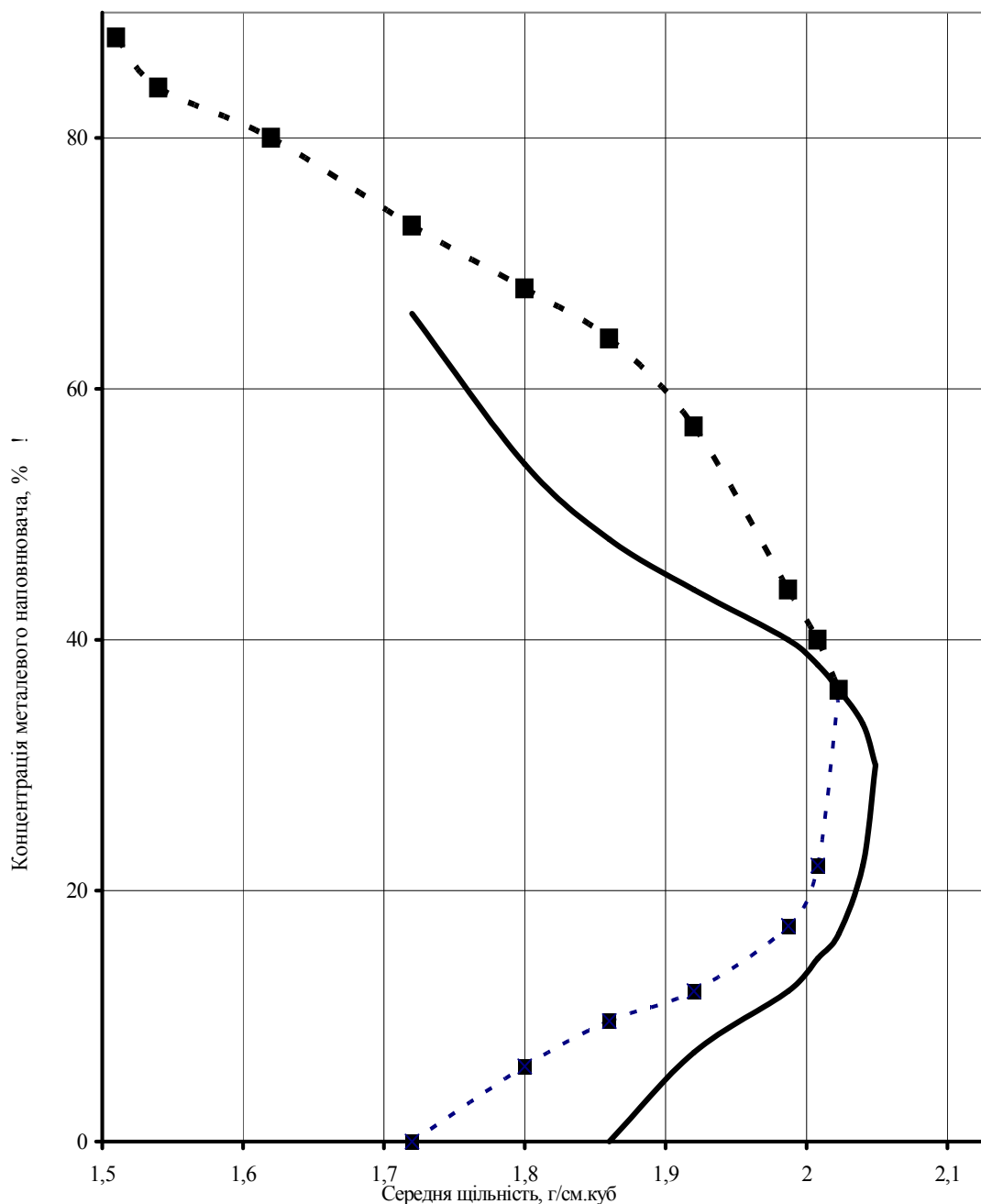




Рис. 2. Уплив кількості металевго наповнювача на середню щільність зразків штукатурки: 1 – метало-цементні суміші; 2 – те ж з додаванням кварцового піску

Використання механічного впливу на формування структури зразків-моделей радіаційнозахисного екрану з дрібнозернистого металонасиченого бетону (жорсткі суміші) шляхом статичного пресування тиском  $20 \text{ кгс/см}^2$  призводить до збільшення середньої густини зразків пресованих плиток порівняно із виробами, виготовленими за технологією штукатурних покриттів. Під впливом пресування відбувається відведення вільної води, а також здійснюється жорстке фіксування частинок металу в гідратованій матриці мінерального в'язучого. Так з рис. 3 видно, що із насиченням цементного в'язучого мікронаповнювачем до 56% мас. середня густина зразків складає  $2.6 \text{ г/см}^3$ , для моделей штукатурного покриття за спільномірної концентрації важкого заповнювача значення  $\rho_m$  складає  $1,76 \text{ г/см}^3$ . Із збільшенням кількості металевго порошку до 86% щільність зразків зменшується до  $2,28 \text{ г/см}^3$ . Додавання до складу суміші крупного діелектричного наповнювача також за аналогією із штукатурними сумішами змінює величину  $\rho_m$  зразків. Крупні частинки піску в процесі приготування суміші руйнують агрегати з частинок металу. За збільшення концентрації до 80% середня щільність зразків дорівнює максимальному значенню –  $2,87 \text{ г/см}^3$  (рис. 3).

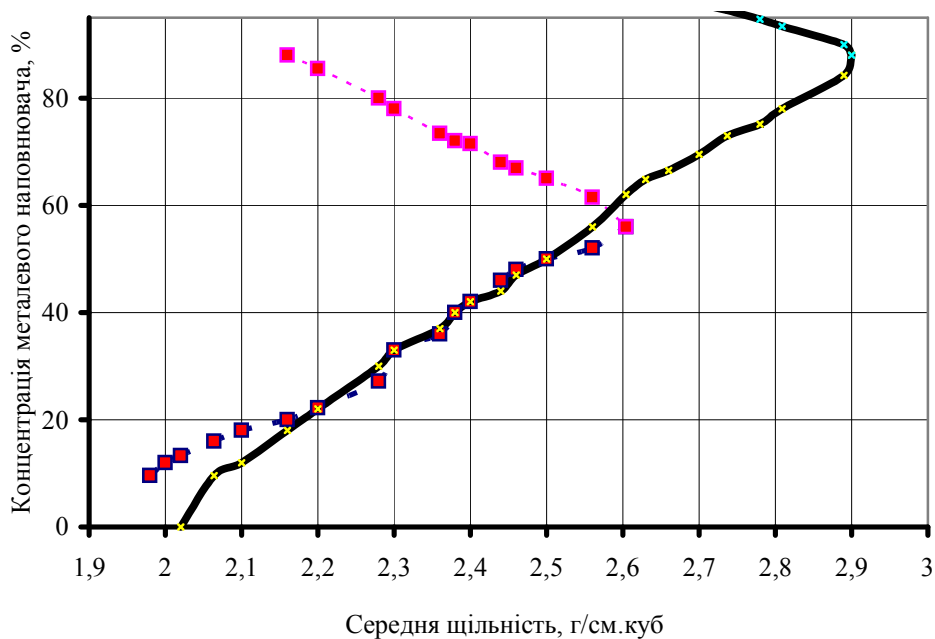


Рис. 3. Уплив кількості металевго наповнювача на середню щільність зразків пресованих плиток: 1 – метало-цементні суміші; 2 – те ж з додаванням крупного піску

Наведені в графічній інтерпретації результати досліджень підтверджують можливість влаштування радіаційнозахисного покриття як за технологією виконання штукатурних робіт, так і шляхом виготовлення екрану зі збірних елементів – пресованих плиток. Аналізуючи процеси послаблення йонізуючих випромінювань захисними екранами, цілком очевидним є можливість отримання підвищення ефективності послаблення йонізуючих випромінювань для пресованих зразків.

Одним із технологічних способів підвищення щільності структури зразків радіаційнозахисного покриття з дрібнозернистого металонасиченого бетону може бути використання в складі суміші поверхневоактивних добавок. Для зменшення кількості

надлишкової води, зумовленої високою гідрофільністю металевого заповнювача в процесі приготування суміші, доцільно використовувати добавки-пластифікатори.

Передумовою наявності спеціальних радіаційнозахисних властивостей зразків отриманого бетону можна пояснити після аналізу послаблення йонізуючого випромінювання під час взаємодії з поглинальною речовиною із поступовим проникненням через товщину матеріалу. Тобто, за рахунок наповнення дрібнозернистого цементного бетону дисперсним, особливо важким, наповнювачем щільність композиту збільшується. Насиченість цементного в'язучого металевим порошком і утворення при цьому залізовмісних гідросилікатів із підвищеним вмістом хімічно зв'язаної води наближує розроблений композиційний матеріал за спеціальними властивостями до багатошарових метало-водяних екранів (послаблення змішаного  $\alpha$  і  $\gamma$  – випромінювання) [23 – 25].

Технологічні параметри виготовлення дрібнозернистих радіаційнозахисних бетонів забезпечуються використанням у якості заповнювача металевих порошоків. Здатність металонасиченого бетону екранувати йонізуючі випромінювання пояснюється перш за все створенням у структурі композиту об'ємної електропровідної матриці за рахунок наповнення в'язучого дрібнодисперсним провідниковим компонентом. Такий матеріал має великі поверхні розділу фаз, що на мікроскопічному рівні можна розглядати як аналогію багатошарових конструкцій бар'єрного захисту у вигляді варіотропних екранів.

Цементні бетони належать до другої групи радіаційнозахисних матеріалів. До їхнього фізико-хімічного складу входять елементи з малими і середніми порядковими номерами. Середня густина отриманих зразків складає  $2,0 \div 2,9$  г/см<sup>3</sup>. Будівельні матеріали з металонасиченого бетону за своїми радіаційнозахисними характеристиками посідають проміжне місце між алюмінієвими екранами й захисними бар'єрами зі свинцю (табл. 2).

Таблиця 2

Лінійні коефіцієнти послаблення  $\gamma$ -випромінювань наявних захисних матеріалів [2, 8, 12]

Матеріал	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Енергія $\gamma$ -квантів						
		0.2 MeV	0.4 MeV	0.6 MeV	0.8 MeV	1.0 MeV	1.5 MeV	2.0 MeV
Алюміній	2.56	0.32	0.25	0.20	0.18	0.16	0.19	0.12
Бетон	2.35	0.291	0.224	0.189	0.166	0.149	0.122	0.104
Свинець	11.3	10.7	2.44	1.33	0.95	0.77	0.66	0.56

Проектуючи біологічний захист від йонізуючих випромінювань, необхідно враховувати, що нарівні із задовільними спеціальними властивостями, матеріали екранувальних конструкцій повинні відповідати цілій низці вимог традиційних будівельних матеріалів. При цьому також треба враховувати збереження технологічності способів виготовлення бар'єрного захисту.

### Висновки

Із представлених результатів досліджень можна зробити висновок, що залежно від допустимої товщини захисного екрана радіаційнозахисні бетони можуть використовуватися в якості монолітної штукатурки або збірного покриття з пресованих плиток. Цілком очевидно, що ефективність послаблення йонізуючих випромінювань переважатиме в пресованих зразках, але потрібно також додатково розв'язати проблему конструкції стиків плиток між собою з метою виключення можливих “прострелів” потоків випромінювань між плитками.

Отже, регулювання рецептурно-технологічних параметрів радіаційнозахисних бетонів із використанням дрібнодисперсного металевого наповнювача у складі матеріалу і створення в результаті фізико-хімічних взаємодій мінерального в'язучого та реакційно здатного



металевого заповнювача об'ємної гетерогенної матриці у формі варіотропних структур у тілі виготовленого екрана забезпечує набування композиційним матеріалом підвищених екранувальних властивостей.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Артемьев В. А. Оценка ослабления гаммаизлучения наноструктурными материалами / В. А. Артемьев // Атомная энергия. – 2002. – Т. 93, № 2. – С. 120 – 128.
2. Шейнич Л. А. Специальные бетоны и композиционные материалы / Л. А. Шейнич // Капстроительство // 2002. – № 8. – С. 47 – 49.
3. Христюч А. В. Снижение уровня радиационных воздействий на организм человека бетелом-м / А. В. Христюч // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. Композиційні матеріали для будівництва. – Макіївка: ДонДАБА, 1999. – №2 (16). – С. 147 – 149.
4. Сердюк В. Р. Передумови використання бетелу-м для іммобілізації рідких радіоактивних відходів / В. Р. Сердюк, О. В. Христюч, Н. Л. Іванова // Будівельні матеріали виробу та санітарна техніка. – 2011. – Вип. 42. – С. 32 – 36.
5. Сердюк В. Р. Фізико-хімічні особливості формування структури електропровідних бетонів / В. Р. Сердюк, М. С. Лемешев, О. В. Христюч // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1997. – № 2. – С. 5 – 9.
6. Христюч О. В. Формування мікроструктури бетонів для захисту від іонізувального випромінювання / О. В. Христюч, М. С. Лемешев // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1998. – № 2. – С. 18 – 23.
7. Сердюк В. Р. Комплексне в'язуче з використанням мінеральних добавок та відходів виробництва / В. Р. Сердюк, М. С. Лемешев, О. В. Христюч // Будівельні матеріали, виробу та санітарна техніка. Науково-технічний збірник. – 2009. – Вип. 33. – С. 57 – 62.
8. Павленко В. І. Радиационно-защитный тяжелый бетон на основе железорудного минерального сырья / В. І. Павленко, Р. Н. Ястребинский, Д. В. Воронов. // Изв. вузов. Строительство. – 2007. – № 4. – С. 40 – 42.
9. Сердюк В. Р. Новий різновид спеціальних бетонів – бетел-м / В. Р. Сердюк, О. В. Христюч // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: Зб. наук. праць. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – С. 18 – 27.
10. Лемешев М. С. Дрібнозернистий бетон з модифікованим заповнювачем техногенного походження / М. С. Лемешев, О. В. Христюч, О. В. Березюк // Materiały XI Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Naukowa przestrzeń Europy – 2015». – Przemysł (Poland): Nauka i studia, 2015. – Volume 23. Ekologia. Geografia i geologia. Budownictwo i architektura. Chemia i chemiczne technologie. – P. 56 – 58.
11. Сердюк В. Р. Технологічні особливості формування металонасичених бетонів для виготовлення радіозахисних екранів / В. Р. Сердюк, М. С. Лемешев, О. В. Христюч // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2007. – № 4. – С. 58 – 65.
12. Шейнич Л. А. Специальные радиационно-защитные композиции / Л. А. Шейнич, Д. В. Анапко. // Современные проблемы строительного материаловедения. Воронеж. – 1999. – С. 602 – 604.
13. Павленко В. І. Тяжелый бетон для защиты от ионизирующих излучений / В. І. Павленко, Р. Н. Ястребинский. // Строительные материалы. – 2007. – № 8. – С. 2 – 4.
14. Лемешев М. С. Покриття із бетелу-м для боротьби з зарядами статичної електрики / М. С. Лемешев, О. В. Христюч // Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві: Науково-технічний збірник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2009. – С. 29 – 31.
15. Сердюк В. Р. Строительные материалы и изделия для защиты от электромагнитного излучения радиочастотного диапазона / В. Р. Сердюк, М. С. Лемешев. // Строительные материалы и изделия. – 2005. – № 4. – С. 8 – 12.
16. Лемешев М. С. Комплексна переробка техногенних відходів хімічної промисловості та металообробних виробництв / М. С. Лемешев, О. В. Христюч, О. В. Березюк // Materiały XI Mezinárodní vědecko-praktická konference «Aktuální možnosti vědy – 2015». – Praha (Chech): Publishing House «Education and Science» s.r.o, 2015. – Díl 7. Fyzika. Matematika. Moderní informační technologie. Výstavba a architektura. Technické vědy. – P. 60 – 62.
17. Лемешев М. С. Электротехнические материалы для защиты от электромагнитного загрязнения

- окружающей среды / М. С. Лемешев, А. В. Христин // Инновационное развитие территорий : Материалы 4-й Междунар. науч.-практ. конф. (26 февраля 2016 г.). – Череповец : ЧГУ, 2016. – С. 78 – 83.
18. Сердюк В. Р. Радіозахисні покриття варіатропної структури із бетелу-м / В. Р. Сердюк, М. С. Лемешев // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2008. – № 5. – С. 37 – 40.
19. Лемешев М. С. Формування структури електропровідного бетону під впливом електричного струму // Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві: Науково-технічний збірник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2006. – С. 36 – 41.
20. Сердюк В. Р. Технологические приемы повышения радиопоглощающих свойств изделий из бетела-м / В. Р. Сердюк, М. С. Лемешев // Строительные материалы и изделия. – 2005. – № 5. – С. 2 – 6.
21. Сердюк, В. Р. Формування структури анодних заземлювачів з бетелу-м для систем катодного захисту / В. Р. Сердюк, М. С. Лемешев, О. В. Христин // Науково-технічний збірник. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. – 2010. – Випуск 35. – С. 99 – 104.
22. Сердюк В. Р. Радіопоглинаючі покриття з бетелу-м / В. Р. Сердюк, М. С. Лемешев // Збірник наукових статей “Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди”. – Рівне, 2005. – Випуск № 12. – С. 62 – 68.
23. Лемешев М. С. Теоретические предпосылки создания радиопоглощающего бетона бетела-м / М. С. Лемешев // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. – 2005. – № 1. – С. 60 – 64.
24. Лемешев М. С. Будівельні матеріали для захисту від електромагнітного випромінювання / М. С. Лемешев, О. В. Березюк // Науковий журнал „Вісник Сумського національного аграрного університету”. Серія: будівництво. – Суми : СумНАУ. 2014. – Вип. 8 (18). – С. 130 – 145.
25. Лемешев М. С. Радиоэкранирующие композиционные материалы с использованием отходов металлообработки / М. С. Лемешев, О. В. Березюк // Инновационное развитие территорий: матер. 2-й Междунар. науч.-практ. конф. (25 – 27 февраля 2014 г.). – Череповец : ЧГУ, 2014. – С. 63 – 65.

Стаття надійшла до редакції 02.03.2020 р.

Стаття пройшла рецензування 18.03.2020 р.

**Христин Олександр Володимирович** – к. т. н., доцент, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури.

**Лемешев Михайло Степанович** – к. т. н., доцент, доцент кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки.

**Черпаха Дмитро Володимирович** – аспірант кафедри будівництва, міського господарства та архітектури.

Вінницький національний технічний університет.