

УДК 691.3

**МЕХАНІЗМ СТВОРЕННЯ ЦЕМЕНТНОГО КОМПОЗИТА З ПІДВИЩЕНИМИ ГІДРОФІЗИЧНИМИ І РАДІАЦІЙНО-ЗАХИСНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ**

Доктори техн. наук Т. О. Костюк, А. А. Пługін, Д. А. Пługін,  
канд. техн. наук О. І. Бондаренко, старш. викл. О. Б. Деденюва

**MECHANISM FOR CREATING A CEMENT COMPOSITE WITH ENHANCED HYDROPHYSICAL AND RADIATION PROTECTION PROPERTIES**

Dr. Sc. (Tech.) T. Kostyuk, Dr. Sc. (Tech.) A. Plugin, Dr. Sc. (Tech.) D. Plugin,  
PhD (Tech) O. Bondarenko, senior lecturer O. Dedenova



DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296647>

***Анотація.** Розроблено цементний композит із підвищеними гідрофізичними та радіаційно-захисними властивостями, для забезпечення яких було, по-перше, модифіковано цемент в'язуче хімічними добавками, що сприяли синтезу кристалогідратів із великим вмістом води; по-друге, до складу додано полідисперсні системи у вигляді залістих кварцитів, у яких мікронні частинки заліза вкраплені у кварцити, що сприяло рівномірному розподілу мікронних частинок заліза в об'ємі композита.*

*Фізико-хімічні дослідження продуктів гідратації цементного каменю проводили методами рентгеноструктурного, диференційно-термічного та електронно-мікроскопічного аналізів.*

*Розроблений склад дрібнозернистого бетону має високі експлуатаційні, гідрофізичні властивості, забезпечує захисні властивості від радіаційного випромінювання за рахунок компонентів, які містять важкі та легкі атоми, що дає змогу застосовувати цей матеріал для захисту будівельних конструкцій, будівель і споруд.*

***Ключові слова:** модифікація цементу, синтез, кристалогідрати, важкі елементи, радіаційне випромінювання, легкі атоми.*

***Abstract.** In modern conditions, the environmental component of building protective materials is guaranteed by the creation of composites capable of protecting underground and above-ground*

parts of buildings and structures in flooded areas from the filtration of radiation-contaminated water, industrial wastewater, radon, etc. Therefore, the problem of developing modern, including radiation-protective materials for the construction industry is urgent. Concrete is a good moderator and absorber of fast neutrons and intensively absorbs gamma radiation. Concrete consists of cement, sand and gravel. Cement consists mainly of oxides of various elements (Ca, Si, Al, Fe) and contains light elements. Portland cements, slag Portland cements and alumina cements are used as binders for the preparation of particularly heavy protective concrete. In special concretes, the most effective binder can be a substance that, as a result of hardening, adds a large amount of water (to increase the hydrogen content of the concrete). Such a substance is calcium hydrosulfoaluminate. Recent studies have shown that very effective radiation protection materials are materials in the form of polydisperse systems containing ultrafine particles (UFP) less than 1 micron in size. However, the difficulty is to distribute the ultrafine particles evenly throughout the material volume, which dramatically reduces its protective functions.

The work resulted in the development of a cement composite with enhanced hydrophysical and radiation protection properties, which were achieved by, firstly, modifying the cement binder with chemical additives that facilitated the synthesis of crystalline hydrates with a high water content. Secondly, polydisperse systems in the form of ferruginous quartzite were added to the composition, where micron-sized iron particles were embedded in quartzite, which contributed to the uniform distribution of micron-sized iron particles in the volume of the composite.

Physicochemical studies of cement stone hydration products were carried out by X-ray diffraction, differential thermal and electron microscopic analyses.

The developed composition of fine-grained concrete has high performance and hydrophysical properties, provides protective properties against radiation due to components containing heavy and light atoms, which may allow the use of this material to protect building structures, buildings and structures.

**Keywords:** cement modification, synthesis, crystal hydrates, heavy elements, radiation, light atoms.

**Постановка проблеми.** Існують водонепроникні високоміцні композиційні матеріали на основі портландцементу. Однак такі матеріали, маючи підвищені гідроізоляційні та фізико-механічні характеристики, повинні мати достатньо товстий шар для забезпечення захисту від радіаційного випромінювання.

У сучасних умовах екологічна компонента подібних матеріалів гарантується створенням композитів, здатних захищати підземні та наземні частини будівель і споруд на обводнених територіях від фільтрації радіаційно-забрудненої води, промислових стоків, радону тощо. Тому проблема розроблення сучасних, у тому числі і радіаційно-захисних, матеріалів для будівельної галузі є актуальною.

Радіаційне випромінювання є потоком альфа, бета і гамма частинок і нейтронів. Гамма-випромінювання має порівняно невелику іонізуючу активність, але через дуже високу проникну здатність становить велику небезпеку для людини.

Послаблюючу дію проникної радіації прийнято характеризувати шаром половинного ослаблення, тобто товщиною матеріалу, проходячи через який ПР зменшується вдвічі. Так, ПР послаблюють вдвічі такі матеріали: свинець завтовшки 1,8 см, цегла – 14 см, сталь – 2,8 см, вода – 23 см, бетон – 10 см, дерево – 30 см.

При створенні сучасних радіозахисних матеріалів визначальними факторами є їхні захисні та механічні властивості, а також вартість і матеріалоемність.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Для захисту від гамма-випромінювання найбільш поширеними матеріалами є свинець, залізо, бетон, залізобетон, вода, свинцеве скло, рідше застосовується збіднений уран, вісмут, тантал та інші важкі речовини.

Для уповільнення швидких нейтронів до теплових застосовуються речовини з малою атомною масою. Найбільш ефективними матеріалами є водневмісні речовини: вода, важка вода, бетон, парафін, поліетилен, різні пластмаси. Після того як швидкі нейтрони сповільнилися, вони можуть бути поглинені. З цією метою застосовують матеріали з великим перерізом поглинання  $\sigma_a$  – бор і матеріали з добавками бору: борні сталі, бораль, графіт борний, карбід бору, борована вода і бетон.

Поглинання нейтронів може супроводжуватися захватним гамма-випромінюванням, тому при виборі матеріалу для поглинання теплових нейтронів треба віддавати перевагу таким, що дають найменше випромінювання. Вода – найпоширеніший і допустимий матеріал, який використовується для уповільнення швидких нейтронів і як захисний матеріал. На атомах водню нейтрони ефективно сповільнюються і перетворюються на теплові. При поглинанні теплових нейтронів у воді виникає захватне гамма-випромінювання з енергією 2,23 МеВ. Застосування борованої води різко знижує захватне гамма-випромінювання. У борованій воді атоми бору легко поглинають теплові нейтрони, а захватне гамма-випромінювання має меншу енергію ( $E_\gamma = 0,5$  МеВ).

Бетон є хорошим сповільнювачем і поглиначем швидких нейтронів, інтенсивно поглинає гамма-випромінювання [1]. До складу бетону входять цемент, пісок і гравій. Цемент складається переважно з оксидів різних елементів (Ca, Si, Al, Fe), містить легкі елементи. Як заповнювачі для такого бетону застосовують матеріали з високою щільністю – барит, магнетит,

лимоніт, а також металевий скрап у вигляді чавунного дробу, обрізків арматурного смугового та профільного металу, металевої стружки тощо [2]. Щільність захисних особливо важких бетонів залежить від виду заповнювача та його густини. Як в'язучі для приготування особливо важких захисних бетонів застосовують портландцементи, шлакопортландцементи і глиноземисті цементи. У спеціальних бетонах найбільш ефективним в'язучим може бути речовина, яка в результаті твердіння приєднує велику кількість води (з метою збільшення вмісту водню в бетоні). Такою речовиною є гідросульфоалюмінат кальцію, який утворюється при взаємодії трикальцієвого алюмінату, що міститься в портландцементі, з гіпсом. Тому один із видів цементу спеціального призначення містить підвищену кількість трикальцієвого алюмінату і гіпсу.

Для поліпшення захисних властивостей гідратних бетонів до їхнього складу вводять добавки, що підвищують вміст у бетоні водню, карбиду, бору, хлористого літію, сірчаноокислого кадмію, та інші добавки, що містять легкі елементи – водень, літій, кадмій і боровмісні речовини [3–5].

У роботі [6] для захисту від іонізуючих випромінювань пропонується застосовувати бетон з добавкою графіту, роботі [7] в електропровідних композитах проникної дії на основі портландцементу – сполучати графіт з добавками, що забезпечують утворення високогідратних солей Фриделя, а роботі [8] – сполучати графіт з натрієвим рідким склом.

Конкурентні переваги РЗ бетонів: екологічна безпека; надійність ізоляції поверхонь складної конфігурації; можливість регулювання товщини захисного покриття шляхом пошарового накладання матеріалу; можливість виготовлення деталей необхідного розміру за товщиною, шириною та довжиною. Радіаційно-захисні бетони рекомендується

використовувати при створенні радіаційно-захисних екранів у регіонах радіаційного забруднення, при спорудженні місць збереження радіоактивних відходів, будівництві об'єктів, що знижують радіаційний фон, підвищенні захисних властивостей і гідроізоляції об'єктів укриття від іонізуючого випромінювання.

Нейтронне та  $\gamma$ -випромінювання мають найбільшу проникну здатність серед усіх видів іонізуючих випромінювань і становлять основну небезпеку для персоналу та обладнання. Тому захисні матеріали та споруди проєктуються зазвичай виходячи з вимог заданого ослаблення саме цих випромінювань. Захисні властивості матеріалу відносно  $\gamma$  нейтронного випромінювання в основному визначаються елементним складом [1]. Носіями функціональних властивостей радіаційно-захисного матеріалу є: відносно  $\gamma$ -випромінювання – елементи з атомними номерами не менше 47 (як правило, залізо або свинець), відносно потоку теплових нейтронів – ряд елементів з атомними номерами 10...20, відносно потоку швидких нейтронів – легкі елементи (водень, літій, вуглець).

При ядерному розпаді найбільшу небезпеку для живих організмів становлять  $\gamma$ -промені та нейтронне випромінювання. Для захисту від них використовують особливо важкі бетони класів С 8/10; С 12/15. В'язучими служать портландцемент, шлакопортландцемент, глиноземистий цемент та ін. Як заповнювачі застосовують матеріали підвищеної щільності – барит, лимоніт, магнетит, чавунний скрап, обрізки сталі, на яких можна отримати бетон із середньою щільністю від 2800 до 5000 кг/м<sup>3</sup>.

Останні дослідження [1-3, 9] показали, що дуже ефективними матеріалами радіаційного захисту є матеріали у вигляді полідисперсних систем, до складу яких входять ультрадисперсні частинки (УДЧ) розміром менше 1 мкм. Проте труднощі полягають у тому, щоб

рівномірно розподілити ультрадисперсні частинки обсягом матеріалу, що різко знижує його захисні функції.

У роботах [10, 11] показано, що фізико-механічні, гідрофізичні та навіть електрофізичні властивості бетонів і композиційних матеріалів переважно залежать від товщини і структури прошарків між частинками заповнювачів, мінеральних добавок, клінкерних реліктів. Тому під час розроблення композиційних матеріалів із заданими властивостями, у т. ч. радіаційно-захисних, доцільно досліджувати залежності цих властивостей від коефіцієнтів розсунення зерен заповнювачів і аналогічних характеристик і використовувати ці залежності для визначення складів матеріалів.

#### **Формулювання мети дослідження.**

Існують ефективні матеріали для захисту від гамма-випромінювання у вигляді сухих будівельних сумішей або спеціальних бетонів, що належать до будівельних матеріалів, призначених для захисту технічних засобів і людини в медичних, виробничих, наукових, адміністративних і житлових приміщеннях від впливу іонізуючих випромінювань. Такі суміші містять як заповнювачі шунгіт, барит, серпентинітовий щебінь або гальку, борати, силікати і гідросилікати свинцю та барію тощо. Подібні мінерали досить рідкісні і не завжди доступні. Склади таких композицій забезпечують захисні властивості від радіаційного випромінювання за рахунок компонентів, що містять важкі та легкі атоми. Однак застосування їх обмежене лише функціями радіаційного захисту.

Тому актуальним стає питання створення важкого водонепроникного бетону з підвищеними радіаційно-захисними властивостями.

**Метою роботи** є створення цементного композита з підвищеними гідрофізичними та радіаційно-захисними властивостями, для забезпечення яких необхідно, по-перше, модифікувати цементе в'язуче хімічними добавками, що

будуть синтезувати кристалогідрати з великим вмістом води; по-друге, залучити до складу полідисперсні системи у вигляді залізистих кварцитів, у яких мікронні частинки заліза вкраплені у кварцити, що сприятиме рівномірному розподілу мікронних частинок заліза в об'ємі композита.

**Виклад основного матеріалу.**

Проведено аналіз можливих заповнювачів з атомами важких елементів з відходів виробництва, що містяться у великих кількостях на території України. Як такий заповнювач було обрано залізисті кварцити, які є відходами рудничного збагачення та містять у своєму складі від 12 до 23 % заліза. Було взято проби з хвостосховища комбінату. Дисперсний склад кварцитів і його істинна густина змінювалися залежно від глибини відбору проб. Розмір частинок кварцитів становив

0,16–0,20 мм (рис. 1), а істинна густина складала 2,81–3,0 г/см<sup>3</sup>.

Мінералогічний склад залізистих кварцитів має середню густину 1900–2400 кг/м<sup>3</sup>, складається з кварцу, бідних зростків кварцу з гематитом, магнетитом і сидеритом із включенням малих частинок (%) вільних зерен магнетиту, гематиту і зростків рудних мінералів. Гранулометричний і хімічний склад наведено в табл. 1, 2.

Для отримання бетону з підвищеними радіаційно-захисними характеристиками було застосовано полідисперсні системи, до складу яких входять ультрадисперсні частинки атомів важких елементів, розмір яких коливається в межах 1 мкм, що забезпечує інтенсивне поглинання рентгенівського та  $\gamma$ -випромінювання [1, 3, 4, 9, 12, 13].

Таблиця 1

Гранулометричний склад залізистих кварцитів

Показник	Розмірність	Залишки на ситах, % за масою				Пройшло крізь сито 0,08
		0,63	0,35	0,16	0,08	
Часткові залишки	%	1	14	34	25	26

Таблиця 2

Хімічний склад залізистих кварцитів

Показник	Склад залізистих кварцитів, %
SiO <sub>2</sub>	67,5–68,5
Fe	13,3–14,0
FeO	12,3–12,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,2–5,9
CaO	2,0–2,4
MgO	3,5–4,6
Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0,8–1,0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03–0,04
SO <sub>2</sub>	0,22–0,275
ППП	5,4–6,3
MnO	0,09–0,102
TiO <sub>2</sub>	0,030–0,035

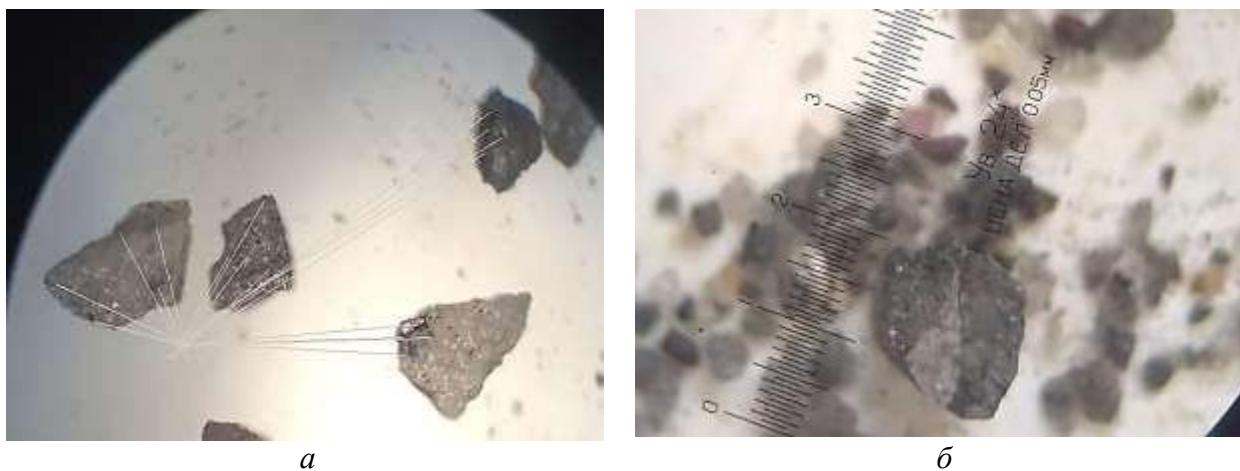


Рис. 1. Залізисті кварцити:  
*а* – залізисті кварцити зі збільшенням  $\times 24$ , стрілками позначені вкраплення заліза;  
*б* – середній розмір частинок залізистих кварцитів

Отже, вкраплені частинки мікронного розміру важких атомів заліза, гематиту і магнетиту в залізистих кварцитах і будуть саме полідисперсними частинками, які забезпечуватимуть поглинання радіаційного випромінювання. А вкраплення цих частинок у зерна кварциту сприятиме рівномірному розподілу важких елементів (заліза, гематиту, магнетиту) у цементному композиті.

Також було проведено дослідження щодо вибору добавок до в'язучого, які дадуть змогу збільшити кількість гідратних новоутворень, що містять значну кількість легких атомів (водню). Було обрано склад хімічних добавок, що дали змогу при гідратації цементу додатково синтезувати сполуки зі значним вмістом легких атомів. Такими сполуками є гідросульфоалюмінати кальцію, гідрохлоралюмінати кальцію, гідрокарбоалюмінати кальцію, гідронітроалюмінати кальцію, портландиту, низькоосновних гідросилікатів кальцію та інших кристалогідратів, що містять водень. Крім того, синтез цих сполук у цементному камені забезпечує підвищення його щільності і водонепроникності. Як в'язуче було використано портландцемент ПЦ І-500.

Фізико-механічні та гідрофізичні властивості досліджено стандартними

методами відповідно до ДСТУ Б В.2.7-126:2011 «Будівельні матеріали. Суміші будівельні сухі модифіковані. Загальні технічні умови»; ДСТУ Б В.2.7-23-95 «Розчини будівельні. Загальні технічні умови»; ДСТУ Б В.2.7-214:2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками». Тріщиностійкість композитів визначалася шляхом визначення поздовжніх деформацій індикаторами вартового типу. Склад продуктів гідратації цементу досліджено фізико-хімічними методами рентгенофазового аналізу та інфрачервоної спектроскопії, мікроструктурний аналіз – методами світлової та електронної мікроскопії.

**Результати досліджень.** Для отримання фізико-механічних характеристик із розробленого складу були виготовлені такі зразки: для фізико-механічних випробувань – зразки балок розміром  $40 \times 40 \times 160$  мм; проведення гідрофізичних випробувань – зразки плит розміром  $200 \times 200 \times 50$  мм. Отримані зразки бетону було витримано в нормально-вологісних умовах, результати досліджень узагальнено в табл. 3.

Таблиця результатів фізико-механічних випробувань складу бетону

Номер з/п	Показник	Склад бетону	
		Контрольний зразок, що не містить компонентів важких і легких атомів	Бетон зразка розробленого складу
1	Терміни тужавіння, год, хв, не більше: початок кінець	5 <sup>46</sup>	3 <sup>12</sup>
		8 <sup>36</sup>	7 <sup>45</sup>
2	Водоутримувальна здатність, %	97,3	98,8
3	Розшарування, %, не більше	2,0	1,5
4	Щільність суміші, г/см <sup>3</sup>	2,03	2,68
5	Межа міцності при стисканні, не менше, МПа	27,0	49,8
6	Межа міцності при згинанні, не менше, МПа	4,1	12,6
7	Адгезія до бетонної поверхні, не менше, МПа	0,5	2,5
8	Морозостійкість, не менше, цикли	100	300
9	Тріщиностійкість за усадковими деформаціями для шару 2–5 мм	без тріщин	без тріщин
10	Водопоглинання, %, не більше	5,2	1,2
11	Марка за водонепроникністю, W, для шару на бетоні: 5–10 мм; 2–3 мм	6	16
		4	12
12	Ударна міцність, Дж/см <sup>3</sup>	5,4	15,5

Фізико-хімічні дослідження продуктів гідратації цементного каменю проводили методами рентгеноструктурного, диференційно-термічного та електронно-мікроскопічного аналізів. Рентгеноструктурні дослідження проб досліджуваних матеріалів проводили за допомогою рентгенівського дифрактометра ДРОН-1,5. Використовували фільтроване випромінювання Си-анода. Прискорювальна напруга становила 35 кВ, струм на аноді – 20 мА.

Електронно-мікроскопічні дослідження структури цементного каменю проводили за допомогою сканувального електронного мікроскопа Jeol JSM-6390/6390LV (Японія), а також на одноступінчастих вугільних репліках за

допомогою електронного мікроскопа Jeol (Японія), що просвічує. Діапазон збільшення – від  $\times 8$  до  $\times 300000$ .

Результати рентгеноструктурного аналізу свідчать, що в розроблених складах, на відміну від контрольного зразка, спостерігаються дифракційні піки кальциту ( $\text{CaCO}_3$ ), низькоосновних і високоосновних гідросилікатів кальцію типу ксонотліту, гілебрандиту, тобермориту, а також гідрооксихлориду кальцію, етрингіту.

На рис. 2 і 3 наведено результати інфрачервоної спектроскопії (ІЧС) цементного каменю. Поглинання області  $3400 \text{ см}^{-1}$  характеризує наявність у цементній пасті та цементному камені Si-OH груп, інтервал  $1400\text{-}1460 \text{ см}^{-1}$  лінії

відповідає коливанням вільної (хімічно незв'язаної) води, інтервал 900-1000  $\text{cm}^{-1}$  відповідає зв'язкам Si-O-Si гідросилікату

кальцію – основним носіям міцності цементного каменю.

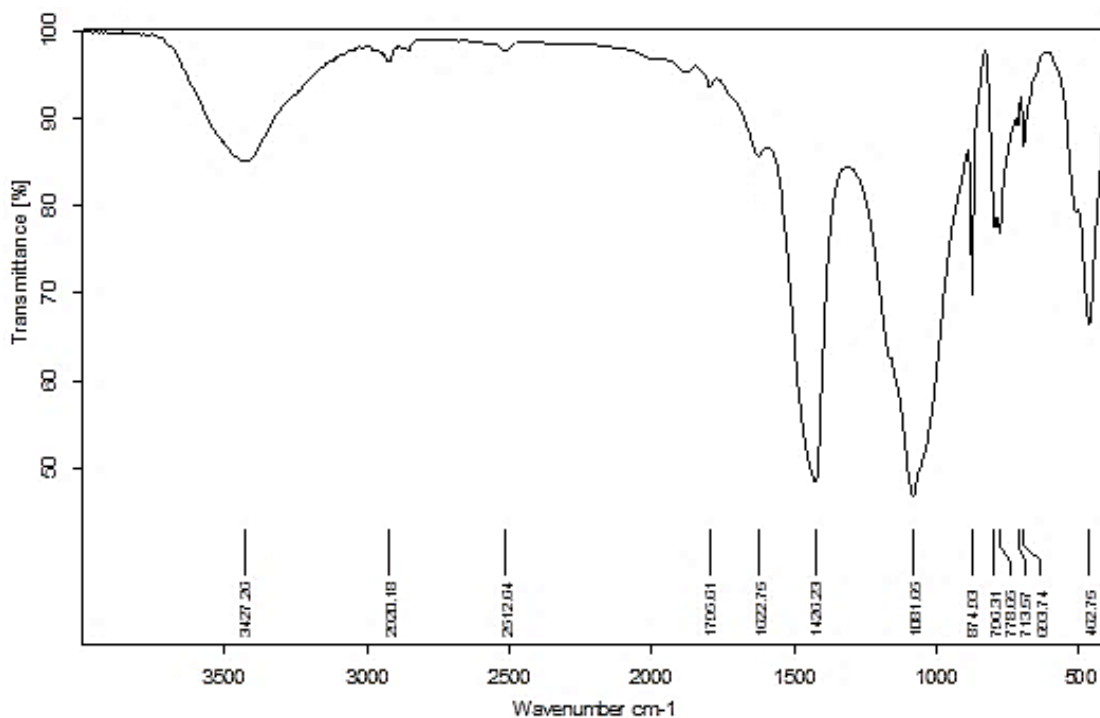


Рис. 2. ІЧ-спектри контрольного зразка

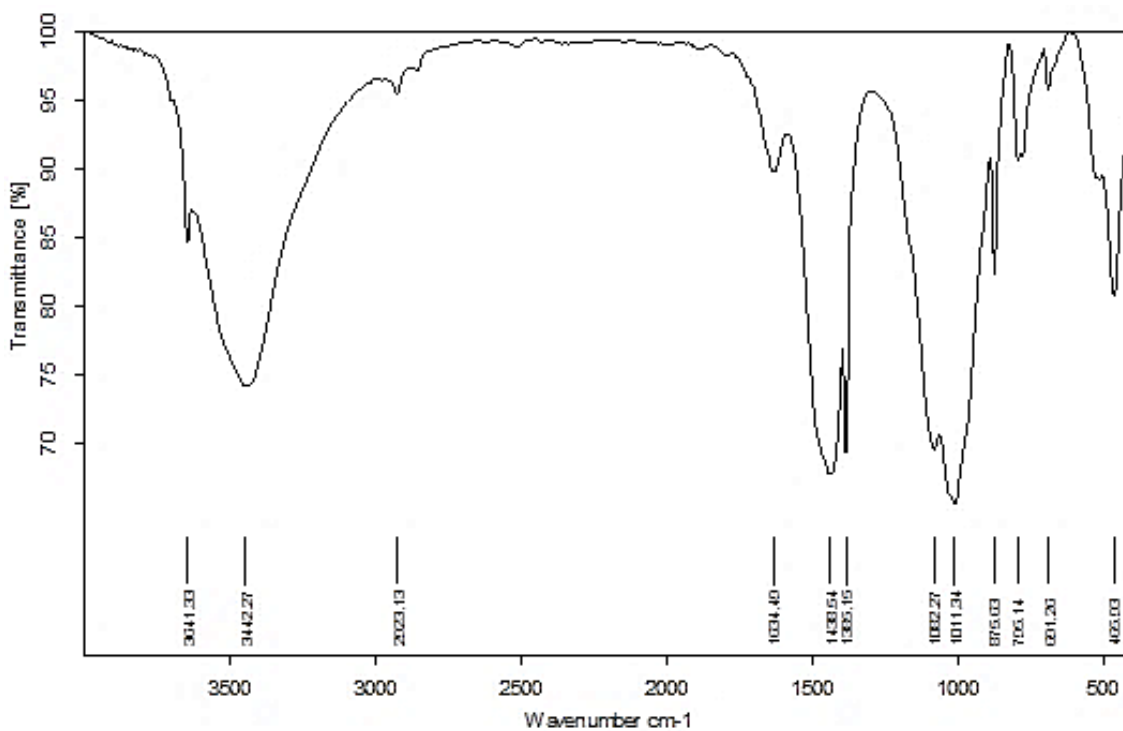


Рис. 3. ІЧ-спектри зразка розробленого складу



Зміщення ліній у розроблених складах в інтервалі  $900-1000\text{ см}^{-1}$  у бік великих значень свідчить про більшу міру полімеризації гідросилікатів кальцію, що впливає на міцність і водонепроникність складів. Інтенсивність ліній у діапазоні  $3000-4000\text{ см}^{-1}$  свідчить про наявність Si-OH груп у цементному камені, і більша інтенсивність їх у розробленому складі свідчить про те, що модифікований цементний камінь характеризується вищою питомою поверхнею гідратних новоутворень. Тобто такий цементний камінь містить більше зв'язаної води, а

отже, і більше легких атомів водню, крім того, міцність і водонепроникність такого складу вищі.

Дослідження мікрофотографій структури розробленого складу підтвердило, що, на відміну від контрольного зразка (рис. 4), він має більш щільну структуру (рис. 5), містить значну кількість еtringіту та інших гідроалюмінатів кальцію, що видно при збільшенні у  $\times 3000$  (рис. 5), на відміну від контрольного зразка. Крім того, видно повстяні новоутворення на рис. 5 низькоосновних гідросилікатів кальцію.

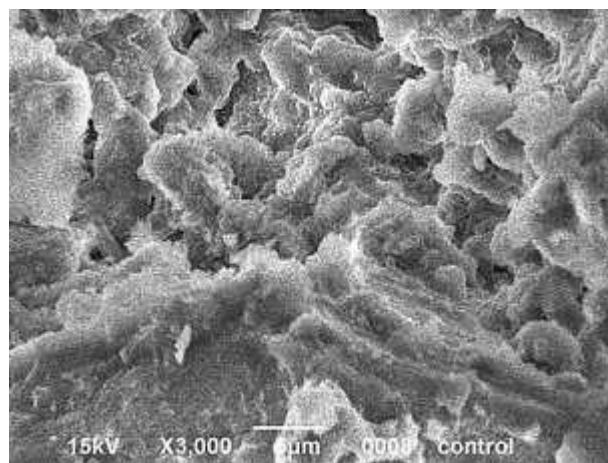
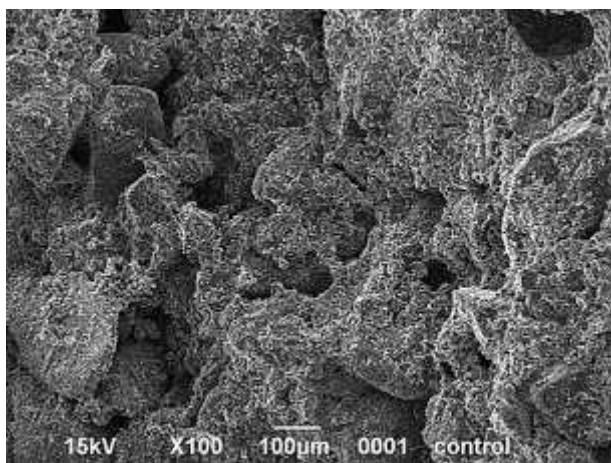


Рис. 4. Мікрофотографії структури контрольного зразка

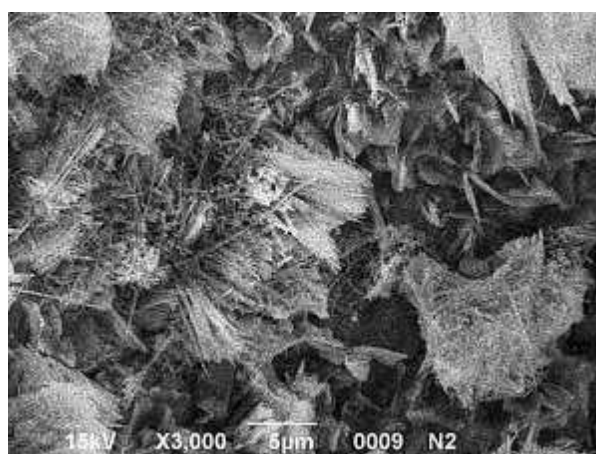
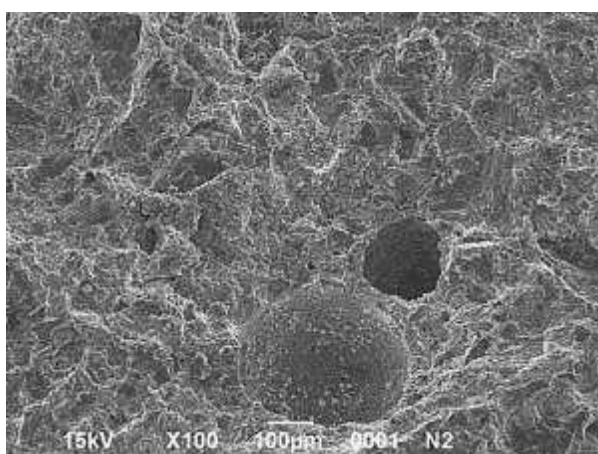


Рис. 5. Мікрофотографії структури зразка розробленого складу

**Висновки.** Розроблений склад дрібнозернистого бетону має високі експлуатаційні, гідрофізичні властивості, забезпечує захисні властивості від радіаційного випромінювання за рахунок

компонентів, які містять важкі та легкі атоми, що дає змогу застосовувати цей матеріал для захисту будівельних конструкцій, будівель і споруд.

### Список використаних джерел

1. Ouda A. S. Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-rayshielding. *Prog.Nucl.Energy*. 48 (E 55). Vol. 79. March 2015. P. 48-55. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.11.009> (last access: 10.11.2023).
2. Obaid S. S., Gaikwad D. K., Pawar P. P. Determination of gamma ray shielding parameters of rocks and concrete. *Radiation Physics and Chemistry*. Vol. 144. March 2018. P. 356-360. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969806X17300889> (last access: 10.11.2023).
3. Azeez A. B. The effect of various waste materials' contents on the attenuation level of anti-radiation shielding concrete. *Materials*. 6 (10). 2013. P. 4836-4846. URL: <https://doi.org/10.3390/ma6104836> (last access: 10.11.2023).
4. Павленко В. І., Матюхін П. В. Основні аспекти розробки сучасних радіаційно-захисних конструкційних металокомпозиційних матеріалів. Сучасні наукомісткі технології. 2005. № 10. С. 85–86. URL: <https://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=23690> (дата звернення: 10.11.2023).
5. Про механізм створення речовин із підвищеними радіаційно-захисними властивостями / В. А. Білоус, Є. А. Джур, Ю. А. Крикун та ін. *Питання атомної науки та техніки*. № 3. Серія: Фізика радіаційних пошкоджень та радіаційне матеріалознавство. (86). 2005. С. 188–189.
6. Христич О. В., Лемешев М. С. Формування мікроструктури бетонів для захисту від іонізувального випромінювання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2. (1998). 18–23.
7. Plugin A. A., Pluhin O. A., Kasyanov V. V., Dyomina O. I., Bondarenko D. O. Portland cement-based penetrating electrically conductive composition for protection against electrocorrosion. *Functional Materials*. 28 (1). (2021). 121-130. URL: <https://doi.org/10.15407/fm28.01.121> (last access: 10.11.2023).
8. Plugin A., Rucińska T., Borziak O., Pluhin O., Zhuravel V. Electrically Conductive Silicate Composite for Protection against Electrocorrosion. *Minerals*. 13 (5). (2023). 610. URL: <https://doi.org/10.3390/min13050610> (last access: 10.11.2023).
9. Tamayo P., Thomas C., Rico J., Setien J., Polanco J., Perez S. and Mananes S. Radiological shielding concrete using steel slags. *Waste and Byproducts in Cement-Based Materials*. January 2021. P. 413–438.
10. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них. Т. 3. Теория прочности, разрушения и долговечности бетона, железобетона и конструкций из них / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, О. А. Калинин и др.; под ред. А. Н. Плуцина. Київ: Наукова думка, 2012. 288 с. URL: <https://is.gd/U1rAcZ> (дата звернення: 10.11.2023).
11. Pluhin O., Plugin A., Plugin D., Borziak O., Dudin O. The effect of structural characteristics on electrical and physical properties of electrically conductive compositions based

on mineral binders. *Matec Web of Conference*. 116 (2017) 01013. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201711601013> (last access: 10.11.2023).

12. Довідник хіміка 21. Хімія та хімічна технологія. URL: <https://chem21.info/page/179217240188189237200029116052204173015184140166/> (дата звернення: 10.11.2023).

13. Явище аномального послаблення рентгенівського випромінювання ультрадисперсними середовищами / В. І. Ткаченко, В. А. Юпенков, Ю. А. Крикун та ін. *Наукові відкриття вчених України*. Київ, 2004. 58 с.

---

Костюк Тетяна Олександрівна, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0002-9246-2899. Тел.: +38(050)6528219. E-mail: [takostuk@ukr.net](mailto:takostuk@ukr.net).

Плугін Андрій Аркадійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-6941-2076. Тел.: +38(057)7301058. E-mail: [plugin\\_aa@kart.edu.ua](mailto:plugin_aa@kart.edu.ua).

Плугін Дмитро Артурович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-4359-4369. Тел.: +38 (057) 730-10-63. E-mail: [plugin.da@kart.edu.ua](mailto:plugin.da@kart.edu.ua).

Бондаренко Олександр Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри геотехніки, підземних споруд і гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0002-5640-6486. Тел.: +38(050)6518773.

E-mail: [oleksandr.bondarenko2@kname.edu.ua](mailto:oleksandr.bondarenko2@kname.edu.ua).

Деденьова Олена Борисівна, старший викладач кафедри матеріалознавства та інженерії композитних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0001-7801-0792. Тел.: +38(097)414-12-24. E-mail: [alena.dedenyova@gmail.com](mailto:alena.dedenyova@gmail.com).

Kostyuk Tetiana, Dr. Sc. (Tech.), Senior Researcher, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0002-9246-2899. Tel.: +38(050)6528219. E-mail: [takostuk@ukr.net](mailto:takostuk@ukr.net).

Plugin Andrii, Professor, Head of the Department of Railway Tracks and Transport Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-6941-2076. Tel.: +38(057)7301058.

E-mail: [plugin\\_aa@kart.edu.ua](mailto:plugin_aa@kart.edu.ua).

Plugin Dmytro, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Head of the Department of Building Materials and Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-4359-4369. Tel.: +38 (057) 730-10-63.

E-mail: [plugin.da@kart.edu.ua](mailto:plugin.da@kart.edu.ua).

Bondarenko Oleksandr, PhD (Tech), Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydraulic Engineering O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0002-5640-6486.

Тел.: +38(050)6518773. E-mail: [oleksandr.bondarenko2@kname.edu.ua](mailto:oleksandr.bondarenko2@kname.edu.ua).

Dedenova Olena, Senior Lecturer, Department of Materials Science and Engineering of Composite Structures, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0001-7801-0792.

Тел.: +38(097)4141224. E-mail: [alena.dedenyova@gmail.com](mailto:alena.dedenyova@gmail.com).

Статтю прийнято 9.12.2023 р.