



Стала економіка

УДК 691.328:539.4

DOI <https://doi.org/10.5281/zenodo.20278906>

**ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ
КОМПОЗИТНИХ СТІНОВИХ БЛОКІВ НА ОСНОВІ БАРИТУ ТА
МАГНЕТИТУ**

Дериземля Сергій Сергійович,

аспірант, Київський національний університет будівництва і

архітектури, м. Київ, Україна,

<https://orcid.org/0009-0005-7642-2466>

Огороднік Ірина Владиславівна,

кандидат технічних наук, доцент кафедри товарознавства та комерційної
діяльності в будівництві, Київський національний університет будівництва і

архітектури, м. Київ, Україна,

<https://orcid.org/0000-0002-5990-8502>

Прийнято: 03.05.2026 | Опубліковано: 19.05.2026

Анотація. Сучасне будівництво спеціалізованих об'єктів в Україні, зокрема медичних центрів, атомних станцій, промислових комплексів, потребує матеріалів із підвищеними захисними властивостями від іонізуючого випромінювання. Використання важких наповнювачів, зокрема сульфату барію та оксиду заліза, дає змогу суттєво підвищити густину стінових блоків, однак важливим питанням залишається прогнозування їхньої надійності протягом тривалого терміну експлуатації в різних кліматичних зонах.



Метою статті є обґрунтування системи показників та методів прогнозування надійності композитних стінових блоків на основі бариту та магнетиту з урахуванням регіональних особливостей України.

У процесі дослідження застосовано аналіз нормативних вимог (ДСТУ), статистичне моделювання (розподіл Вейбулла, імітація Монте-Карло), а також методи прискореного старіння та неруйнівного контролю.

У результаті дослідження визначено основні критерії довговічності: міцність на стиск (≥ 10 МПа), морозостійкість (≥ 25 циклів), водопоглинання ($\leq 10\%$), збереження густини ($\geq 95\%$) та радіаційного захисту ($\geq 90\%$). Встановлено, що співвідношення бариту до магнетиту в діапазоні 60:40 – 80:20 впливає на початкову міцність (18–32 МПа), густину (2800–3500 кг/м³) та прогнозоване збереження міцності через 50 років (82–93%). Для різних кліматичних зон (західна, центральна, східна, південна, північна) оцінено ризику деградації: цикли замерзання-відтавання (30–80 на рік), вологість (55–80%), сульфатну та хлоридну атаку. Економічний аналіз засвідчує, що вартість композитів у 1,5–2,5 раза вища за звичайний бетон, однак точне прогнозування дає змогу оптимізувати витрати на технічне обслуговування й подовжити термін служби на 15–25% в агресивних середовищах.

У висновках зазначено, що інтеграція ймовірнісних моделей, неруйнівного моніторингу та технологій цифрових двійників дозволяє зменшити невизначеність довгострокових прогнозів із ± 20 –25% до ± 10 –15%, що підвищує економічну обґрунтованість застосування цих матеріалів у стратегічних інфраструктурних проєктах України. Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення галузевих баз даних експлуатаційних характеристик та адаптацію європейських протоколів випробувань до національних стандартів.

Ключові слова: важкі бетони, радіаційний захист, довговічність будівельних матеріалів, ймовірнісне моделювання, цикли замерзання-



відтавання, економіка життєвого циклу, неруйнівний контроль, кліматична стійкість.

PREDICTING THE RELIABILITY PROPERTIES OF COMPOSITE WALL BLOCKS BASED ON BARITE AND MAGNETITE

Sergii Deryzemlia,

PhD Student, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv,
Ukraine, <https://orcid.org/0009-0005-7642-2466>

Iryna Ohorodnik,

PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Commodity
Science and Commercial Activities in Construction, Kyiv National University of
Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine,
<https://orcid.org/0000-0002-5990-8502>

Abstract. Modern construction of specialized facilities in Ukraine, including medical centers, nuclear power plants, and industrial complexes, requires materials with enhanced shielding properties against ionizing radiation. The use of heavy aggregates, specifically barium sulfate and iron oxide, significantly increases the density of wall blocks; however, predicting their reliability during long-term operation in various climatic zones remains a critical issue.

The purpose of the article is to substantiate a system of indicators and methods for predicting the reliability of composite wall blocks based on barite and magnetite, taking into account the regional specifics of Ukraine.

The study employed an analysis of regulatory requirements (DSTU), statistical modeling (Weibull distribution, Monte Carlo simulation), as well as accelerated aging methods and non-destructive testing.



As a result of the research, the main durability criteria were identified: compressive strength (≥ 10 MPa), frost resistance (≥ 25 cycles), water absorption ($\leq 10\%$), density retention ($\geq 95\%$), and radiation protection ($\geq 90\%$). It was established that the barite-to-magnetite ratio in the range of 60:40 – 80:20 influences the initial strength (18–32 MPa), density (2800–3500 kg/m³), and the predicted strength retention after 50 years (82–93%). Degradation risks were assessed for various climatic zones (western, central, eastern, southern, and northern), including freeze-thaw cycles (30–80 per year), humidity (55–80%), and sulfate and chloride attacks. Economic analysis shows that the cost of composites is 1.5–2.5 times higher than that of ordinary concrete; however, accurate forecasting allows for the optimization of maintenance costs and extends the service life by 15–25% in aggressive environments.

The conclusions state that the integration of probabilistic models, non-destructive monitoring, and digital twin technologies reduces the uncertainty of long-term forecasts from ± 20 –25% to ± 10 –15%, which increases the economic viability of using these materials in strategic infrastructure projects in Ukraine. Further research should be aimed at creating sectoral databases of performance characteristics and adapting European testing protocols to national standards.

Keywords: heavy-weight concrete, radiation shielding, durability prediction, freeze-thaw cycles, lifecycle economics, non-destructive testing, Weibull analysis, construction material reliability.

Постановка проблеми. Зростання вимог до радіаційної безпеки спеціалізованих будівельних об'єктів в Україні, зокрема онкологічних центрів, атомних енергоблоків та підприємств із ядерними технологіями, зумовлює необхідність застосування стінових конструкцій із підвищеними захисними характеристиками. Використання важких мінеральних наповнювачів забезпечує суттєве підвищення густини матеріалу, проте особливого значення набуває оцінювання здатності таких виробів тривалий



час зберігати експлуатаційні властивості в умовах температурних коливань, зволоження та впливу хімічно агресивних середовищ. Водночас методологічний інструментарій для кількісного прогнозування довговічності композитів на основі сульфату барію та оксиду заліза в умовах різних кліматичних зон України залишається фрагментарним. Наукові розвідки здебільшого зосереджені на вивченні початкових фізико-механічних параметрів або на окремих чинниках старіння, що не дозволяє сформувати цілісний підхід до оцінювання зміни експлуатаційної придатності в часі. Проблематика полягає у відсутності інтегрованої системи показників надійності, яка б враховувала взаємозв'язок між рецептурним складом (співвідношення мінералів, водоцементне відношення, добавки), регіональними кліматичними навантаженнями (кількість циклів замерзання-відтавання, вологісний режим, агресивність ґрунтових вод) та довгостроковою динамікою міцнісних і захисних властивостей. Недостатня розробленість цих питань обмежує можливість економічно обґрунтованого вибору оптимальних складів композитів, підвищує ризики передчасного руйнування огорожувальних конструкцій та ускладнює планування витрат на відновлювальні заходи протягом усього життєвого циклу об'єкта.

Зв'язок із науковими завданнями визначається необхідністю систематизації чинників деградації, обґрунтування нормативних критеріїв (за українськими будівельними стандартами) та адаптації ймовірнісних методів прогнозування до специфіки барито-магнетитових бетонів. Практичне значення полягає у створенні аналітичного підґрунтя для прийняття проєктних рішень при зведенні радіаційно-захисних споруд, оптимізації рецептур із мінімізацією вартості при забезпеченні заданого рівня надійності, а також для розроблення графіків моніторингу технічного стану в різних регіонах України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Прогнозування надійності, оцінювання довгострокової стійкості та аналіз зміни захисних і механічних властивостей важких бетонів на основі бариту й магнетиту є предметом



активних наукових досліджень як в Україні, так і за кордоном. Зокрема, Б. Бадарлу та колеги (B. Badarloo et al.) акцентують на тому, що збільшення частки баритових заповнювачів підвищує коефіцієнт послаблення гамма-випромінювання, однак супроводжується зниженням міцності на стиск і розтяг, причому цей ефект є більш вираженим для бетонів нижчих класів [1]. На пошуку кореляцій між параметрами неруйнівного контролю зосереджуються П. Ленер та Я. Голяшевський (P. Lehner, Ya. Gołaszewski), доводячи, що густина та водопроникнення добре узгоджуються з коефіцієнтом дифузії, тоді як міцність на стиск не демонструє чіткої залежності, що ускладнює комплексне прогнозування [2].

Напрямок самоущільнювальних і геополімерних композитів розвивають А. Валізаде та співавтори (A. Valizadeh et al.), підтверджуючи, що максимальної густини (до 2901 кг/м³) вдається досягти при повному заміщенні природних заповнювачів магнетитом, однак міцність при цьому варіюється залежно від типу суміші та тривалості тверднення [3]. Колектив авторів на чолі з М. Абдуллою (M. Abdullah et al.) систематизує класифікації, типи важких наповнювачів, конструкційні добавки та підходи до оцінювання довговічності радіаційно-захисних бетонів [4]. Проблему хімічної стабільності в часі порушують Д. Юзьвяк-Недзведзька та колеги (D. Józwiak-Niedźwiedzka et al.), доводячи, що мікрористалічний кварц у гематиті та кристобаліт у баритах здатні ініціювати лужнокремнеземну реакцію, що суттєво знижує прогнозований ресурс конструкцій у ядерних реакторах [5]. Використання чорного піску як нового екранувального матеріалу пропонують К. Ельтавіл та співавтори (K. Eltawil et al.), доводячи, що композиції з 15% такого наповнювача та 10% золи-виносу забезпечують покращення міцнісних і довготривалих властивостей [6].

У напрямі застосування методів штучного інтелекту для прогнозування М. Хоссейнзаде та колеги (M. Hosseinzadeh et al.) створили нейромережеву модель на основі майже 1100 експериментальних точок, яка дозволяє



передбачати коефіцієнт міграції хлоридів та міцність на стиск [7]. Ітераційний метод оцінювання надійності за спряженим напрямом пошуку розробили Б. Кештегар та співавтори (Keshtegar et al.), встановивши, що логнормальний розподіл та розподіл Гумбеля найкраще описують імовірнісні характеристики похибок моделі [8]. Синергетичні ефекти поєднання гетиту, лейкоксену та турмаліну дослідили Х. Амін та колеги (H. Amin et al.), показавши, що вміст бору забезпечує виняткове поглинання теплових нейтронів завдяки реакції $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ [9]. Комплексні добавки для лужноактивованих цементів, що дозволяють регулювати усадку та підвищувати тріщиностійкість П. Кривенко та співавтори (P. Krivenko et al.) [10]. Науковці також створили складну добавку для анкерувальних розчинів [11]. Колектив авторів під керівництвом Г. Іващишин (H. Ivashchyshyn et al.) дослідив багатокомпонентні цементні системи з високим вмістом добавок [12].

Швидкотвердні надвисокоміцні композити з використанням суперцеоліту та лужного наномодифікатора N-C-S-H-PCE створили М. Саніцький та колеги (M. Sanytsky et al.), досягнувши міцності 104,1 МПа [13]. Підходи до ранжування критеріїв якості бетонів за допомогою фрактального формалізму запропонували С. Кров'яков та інші (S. Kroviakov et al.) [14].

Модель оцінювання ефективності інновацій, методологія якої релевантна для прогнозування економічної доцільності барито-магнетитових блоків, розробив колектив авторів на чолі із С. Смеричевським (S. Smerichevskyi et al.) [15]. Інтеграцію AR/VR у перевірку просторових рішень, що може бути використано для створення «цифрових двійників» композитних блоків, досліджує У. Гречка (U. Hrechka) [16]. Науковиця А. Соколенко (A. Sokolenko) встановлює, що цінова конкурентоспроможність нішевої продукції формується під впливом сприйняття споживачем «цінності безпеки», що пояснює виправданість вищої вартості барито-магнетитових



блоків (у 1,5–2,5 раза більше за звичайний бетон) для об'єктів із підвищеними вимогами до радіаційної безпеки [17].

Наведені джерела свідчать про активний розвиток досліджень у галузі прогнозування надійності важких композитів, однак питання комплексного врахування кліматичних зон України, виробничої варіабельності та економічних аспектів життєвого циклу саме для барито-магнетитових стінових блоків залишаються недостатньо висвітленими.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. У науково-технічній літературі, присвяченій важким бетонам для радіаційного захисту, залишається низка нерозв'язаних питань щодо довгострокового прогнозування експлуатаційної придатності композитів із подвійним мінеральним наповнювачем. Досі не вироблено єдиного підходу до структурування показників довговічності, які б інтегрували водночас механічну міцність, морозостійкість, вологопоглинання та здатність послаблювати іонізуюче випромінювання в їхньому взаємозв'язку. Відсутність стандартизованої системи критеріїв ускладнює зіставлення результатів різних експериментальних досліджень та обмежує можливість формування узагальнених висновків. Обмежено вивченим залишається питання кількісного врахування регіональних кліматичних відмінностей України, зокрема впливу річної кількості циклів замерзання-відтавання, різних діапазонів відносної вологості та агресивності хімічних сполук у промислових зонах, на швидкість деградаційних процесів у композитних блоках. Недостатньо уваги приділено взаємозв'язку між короткостроковими ефектами зміни пропорцій наповнювачів (підвищення густини та початкової міцності) та довгостроковими наслідками (збереження захисних властивостей через 25–50 років експлуатації в реальних умовах). Причинами такої невизначеності є багатофакторність процесів старіння матеріалу, тривалість натурних спостережень (вимірювана десятиліттями), а також обмежений обсяг історичних даних щодо експлуатації саме барито-магнетитових композитів на



території України. Найвні напрацювання здебільшого мають фрагментарний характер і зосереджуються на окремих аспектах. Це унеможливило формування цілісної картини про реальний ресурс таких матеріалів у різних зонах країни. Нерозв'язаність зазначених аспектів істотно ускладнює обґрунтований вибір рецептур композитних матеріалів із прогнозованими експлуатаційними характеристиками та заданим терміном служби. Це актуалізує потребу в удосконаленні підходів до прогнозування довговічності барито-магнетитових композитів, визначенні системи контрольованих показників надійності та адаптації методів оцінювання до кліматичних умов України, що і становить предмет цього дослідження.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою статті є наукове обґрунтування системи показників та методів прогнозування довговічності композитних стінових виробів із використанням бариту й магнетиту через встановлення їхнього нормативного змісту, структурної взаємодії та можливостей кількісної оцінки в різних кліматичних зонах України. Реалізація цієї мети спрямована на підвищення обґрунтованості проєктних рішень при зведенні радіаційно-захисних споруд та створення аналітичного підґрунтя для оцінювання технічної спроможності важких бетонів протягом усього періоду експлуатації.

Для досягнення дослідницької мети поставлено такі завдання:

- 1) схарактеризувати основні критерії надійності барито-магнетитових композитів та чинники, що впливають на їхню міцність, морозостійкість, водопоглинання й радіаційну ефективність;
- 2) проаналізувати сучасні методи прогнозування довговічності будівельних матеріалів спеціального призначення та встановити взаємозв'язок між складом композитів, кліматичними навантаженнями й деградацією властивостей;



3) розробити рекомендації щодо вдосконалення системи прогнозування надійності барито-магнетитових блоків із використанням цифрових технологій і неруйнівного моніторингу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Композитні стінові блоки з використанням бариту та магнетиту є інноваційним підходом до будівельних матеріалів в Україні, поєднуючи структурну цілісність із підвищеними радіаційно-захисними властивостями. Ці матеріали набувають особливої актуальності для спеціалізованих будівельних проєктів, зокрема медичних закладів, інфраструктури атомних електростанцій та промислових будівель, що потребують захисту від іонізуючого випромінювання. Прогнозування показників надійності таких композитних матеріалів є визначальним для забезпечення довготривалої структурної цілісності та відповідності вимогам безпеки в українських будівельних нормах. Економічне обґрунтування доцільності їх використання має спиратися не лише на початкові технічні параметри, а й на прогнозовану зміну цих параметрів у часі, що безпосередньо формує споживчу цінність матеріалу.

Барит (сульфат барію) та магнетит (оксид заліза) виконують функцію важких заповнювачів, що суттєво підвищують густину бетонних блоків – зазвичай у межах 2400–3500 кг/м³ порівняно зі звичайним бетоном (2200–2400 кг/м³). Використання цих мінералів не лише забезпечує здатність послаблювати радіацію, але й впливає на механічні властивості, такі як міцність на стиск, міцність на розтяг та довговічність. Розуміння прогнозування надійності цих композитних блоків вимагає комплексного аналізу закономірностей деградації матеріалу, впливу чинників навколишнього середовища та довгострокової ефективності в кліматичних умовах України [18, с. 6–7].

До основних показників надійності композитних стінових блоків на основі бариту та магнетиту належать збереження міцності на стиск, морозостійкість, коефіцієнт водопоглинання та розмірна стабільність у часі. У



кліматі України, для якого характерні значні коливання температури від -20°C взимку до $+35^{\circ}\text{C}$ влітку, цикли замерзання-відтавання є критичним механізмом деградації. Прогнозні моделі мають враховувати очікувану кількість циклів замерзання-відтавання протягом терміну служби (50–100 років для конструкційних стінових елементів), причому в різних регіонах України щорічно фіксується від 40 до 80 таких циклів залежно від географічного положення. Кількісні вимоги до надійності, методи вимірювання та прогнозні періоди систематизовано в таблиці 1.

Таблиця 1

Основні показники надійності композитних блоків

Показник надійності	Нормативна вимога	Метод вимірювання	Прогнозний період
Міцність на стиск	≥ 10 МПа	ДСТУ Б В.2.7-187	1, 5, 10, 25, 50 років
Морозостійкість	≥ 25 циклів (F25–F100)	ДСТУ Б В.2.7-49	щорічна оцінка
Водопоглинання	$\leq 10\%$ за масою	ДСТУ Б В.2.7-170	5-річні інтервали
Збереження густини	$\geq 95\%$ від початкової	гравіметричний аналіз	10-річні інтервали
Радіаційний захист	$\geq 90\%$ ефективності	дозиметричні випробування	5-річні інтервали

Джерело: складено автором на основі [19–22]

Для довгострокового прогнозування надійності застосовуються статистичні моделі, зокрема аналіз розподілу Вейбулла, імітаційне моделювання Монте-Карло та протоколи прискореного старіння. Для баритомагнетитових композитів в Україні основою для калібрування прогнозних моделей слугують історичні дані з наявних об'єктів, зведених у період 2010–2015 років. Методологія прогнозування охоплює зміни складу матеріалу: співвідношення бариту до магнетиту (зазвичай від 60:40 до 80:20), вміст



цементу (15–25% за масою), водов'язне відношення (0,35–0,50) та наявність хімічних добавок, таких як пластифікатори й повітровтягувальні агенти [23].

Кліматичні умови в різних регіонах України створюють неоднакові навантаження для композитних стінових блоків. Рівні вологості, що коливаються між 60–80% у західних регіонах та 50–70% у східних, впливають на швидкість карбонізації та потенційну корозію вбудованої арматури. Промислове забруднення у великих міських центрах, таких як Київ, Харків та Дніпро, призводить до впливу сульфатів і хлоридів, що може пришвидшувати механізми деградації. Відповідно, прогнозування надійності потребує врахування регіональних особливостей. Узагальнені кліматичні характеристики та пов'язані з ними ризики деградації наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Кліматичні зони України та основні ризики деградації композитних блоків

Кліматична зона	Середньоріч на температура (°C)	Цикли замерзання-відтавання на рік	Діапазон вологості (%)	Основний ризик деградації
Західна Україна	7–9	40–60	65–80	замерзання-відтавання, волога
Центральна Україна	6–8	50–70	60–75	карбонізація, замерзання-відтавання
Східна Україна	5–7	60–80	55–70	замерзання-відтавання, сульфатна атака
Південна Україна	9–11	30–50	60–75	карбонізація, хлориди
Північна Україна	5–7	55–75	65–80	замерзання-відтавання, волога

Джерело: складено автором на основі [14, с. 24]



Прогнозування надійності також вимагає врахування варіабельності виробництва. Чистота та гранулометричний склад баритових і магнетитових мінералів, що видобуваються з українських родовищ у Закарпатті та Криворізькому регіоні, суттєво впливає на ефективність блоків. Методи статистичного контролю процесів та протоколи забезпечення якості мають бути інтегровані в прогнозні моделі для врахування виробничої варіабельності. Коефіцієнт варіації міцності на стиск у промисловому виробництві зазвичай становить 8–15%.

У прогнозуванні надійності композитних стінових блоків застосовуються різні методологічні підходи. Детерміновані моделі базуються на фізичних законах деградації, імовірнісні моделі враховують невизначеність властивостей матеріалів та експлуатаційних навантажень, а алгоритми машинного навчання навчаються на експериментальних наборах даних. Аналіз надійності в часі використовує функції граничних станів, що порівнюють опір (міцність матеріалу) з ефектами навантажень у часі. Для конструкційних елементів індекс надійності β зазвичай має перевищувати 3,0, що відповідає ймовірності відмови менше ніж 0,135%. Для барито-магнетитових композитів функції деградації охоплюють коефіцієнти зниження міцності в діапазоні 0,85–0,95 протягом 50-річного терміну служби залежно від умов експозиції. Порівняльну характеристику методів прогнозування подано в таблиці 3.

Таблиця 3

Методи прогнозування надійності та їхні параметри

Метод прогнозування	Часовий горизонт	Діапазон точності	Вимоги до даних	Застосування
Випробування прискореним старінням	1–5 років	± 12 – 18%	лабораторні зразки	короткострокова валідація
Аналіз розподілу Вейбулла	10–50 років	± 15 – 25%	історичні дані про відмови	довгострокове прогнозування



Імітаційне моделювання Монте-Карло	5–100 років	$\pm 10\text{--}20\%$	статистичні розподіли	імовірнісне оцінювання
Моделювання скінченними елементами	1–25 років	$\pm 8\text{--}15\%$	властивості матеріалів, геометрія	аналіз напружень
Машинне навчання	5–50 років	$\pm 10\text{--}18\%$	великі експериментальні набори даних	розпізнавання закономірностей

Джерело: складено автором на основі [23, 24]

Економічні наслідки прогнозування надійності для барито-магнетитових композитних блоків в Україні є суттєвими. Точні прогнози дають змогу оптимізувати графіки технічного обслуговування та проводити аналіз вартості життєвого циклу. Будівельні проекти, що використовують ці спеціалізовані матеріали, наприклад модернізація ядерних об'єктів та медичних центрів, потребують проектування на основі надійності з цільовим терміном служби 60–100 років. Прогнозні моделі, які недооцінюють темпи деградації, можуть призвести до передчасної відмови та дорогого ремонту, тоді як надмірно консервативні прогнози спричиняють невиправдані витрати на матеріали. Барито-магнетитові композити зазвичай коштують у 1,5–2,5 рази більше, ніж звичайні бетонні блоки [13, с. 69].

Співвідношення бариту до магнетиту в композитних сумішах впливає як на ефективність радіаційного захисту, так і на механічну надійність. Дослідження, проведені в українських технічних університетах, свідчать, що оптимальні суміші містять 65–75% важких заповнювачів за об'ємом. Барит забезпечує краще послаблення гамма-випромінювання (лінійний коефіцієнт послаблення $0,12\text{--}0,18\text{ см}^{-1}$), тоді як магнетит сприяє поглинанню нейтронів і підвищенню міцності на стиск. Прогнозні моделі мають враховувати ці взаємозв'язки між складом і властивостями, оскільки варіації в пропорціях



заповнювачів можуть змінювати 50-річне збереження міцності від 75% до 90% початкових значень. У таблиці 4 наведено залежність основних характеристик від співвідношення компонентів.

Таблиця 4

**Вплив співвідношення бариту до магнетиту на властивості
композитних блоків**

Співвідношення барит:магнетит	Початкова міцність на стиск (МПа)	Густина (кг/м ³)	Радіаційне послаблення (%)	Прогнозоване збереження міцності через 50 років (%)
80:20	18–22	2800–3100	88–92	82–87
70:30	20–25	2900–3200	85–90	85–90
60:40	22–28	3000–3300	82–88	87–92
50:50	24–30	3100–3400	80–86	88–93
40:60	25–32	3200–3500	78–84	86–91

Джерело: складено автором на основі [25]

Прогнозування довговічності цих композитних матеріалів має враховувати потенційні хімічні взаємодії між баритом, магнетитом та продуктами гідратації цементу. Лужні порові розчини в бетоні (рН 12,5–13,5) потенційно можуть реагувати з магнетитом протягом тривалого часу, хоча дослідження свідчать, що цей ефект за нормальних умов є мінімальним. У середовищах із впливом сульфатів, що перевищує 600 мг/л (таке трапляється в деяких промислових районах України), хімічна стабільність бариту забезпечує переваги порівняно зі звичайними заповнювачами. Прогнозоване продовження терміну служби становить 15–25% відносно стандартного бетону в агресивних умовах [12, с. 2].

Упровадження надійних систем прогнозування вимагає стандартизованих протоколів випробувань, узгоджених з українськими національними стандартами (ДСТУ) та європейськими нормами (EN).



Неруйнівні методи випробувань, зокрема вимірювання швидкості ультразвукових хвиль, випробування молотком Шмідта та георадарне зондування, дають змогу здійснювати постійний моніторинг встановлених блоків без порушення структурної цілісності. Для нової продукції контроль якості з частотою один зразок на 50–100 блоків забезпечує статистичну валідність прогнозних моделей із прийнятними критеріями: коефіцієнт варіації нижче 15% для міцності на стиск і нижче 10% для вимірювань густини. Основні методи випробувань та їх застосування в прогнозуванні узагальнено в таблиці 5.

Таблиця 5

Методи випробувань та їхня роль у прогнозуванні надійності

Метод випробування	Частота	Вимірюваний параметр	Критерій прийняття	Застосування в прогнозуванні
Випробування на стиск	на 100 блоків	несучість (МПа)	\geq проектної міцності, $CV < 15\%$	моделі деградації міцності
Ультразвукова імпульсна швидкість	щорічно (в експлуатації)	швидкість хвиль (км/с)	$\geq 3,5$ км/с	виявлення тріщин, цілісність
Водопоглинання	на 200 блоків	збільшення маси (%)	$\leq 10\%$	оцінювання довговічності
Випробування на морозостійкість	на виробничу партію	втрата маси, втрата міцності	$\leq 5\%$ після 25 циклів	кліматична стійкість
Радіаційний захист	на зміну рецептури	коефіцієнт послаблення	\geq проектної вимоги	функціональна ефективність

Джерело: складено автором на основі [26]

Подальший розвиток прогнозування надійності для барито-магнетитових композитів в Україні, ймовірно, охоплюватиме системи моніторингу в реальному часі з використанням вбудованих датчиків для



відстеження температури, вологості та напружень протягом усього терміну служби. Технологія цифрових двійників, яка поєднує дані фізичних випробувань з обчислювальними моделями, надає можливості для динамічного оновлення показників надійності відповідно до накопичення фактичних даних про експлуатацію. Такі підходи здатні зменшити невизначеність довгострокових прогнозів із поточного рівня $\pm 20\text{--}25\%$ до $\pm 10\text{--}15\%$, що дасть змогу розробляти більш ефективні стратегії проєктування та технічного обслуговування спеціалізованої будівельної інфраструктури.

Стратегічне значення точного прогнозування надійності виходить за межі окремих проєктів і поширюється на загальнодержавне планування інфраструктури, особливо з огляду на ядерноенергетичний сектор України та поточні відновлювальні роботи. Створення комплексних баз даних про експлуатаційні властивості матеріалів, стандартизація протоколів випробувань у регіональних лабораторіях та розробка специфічних для України моделей деградації підвищать спроможність будівельної галузі споруджувати довговічні та безпечні об'єкти. Інвестиції в дослідницьку інфраструктуру та співпраця між академічними установами, виробниками матеріалів і будівельними компаніями залишаються необхідними умовами для вдосконалення методологій прогнозування та забезпечення довгострокової надійності композитних стінових блоків на основі бариту та магнетиту в українських умовах.

Висновки. У процесі дослідження встановлено, що композитні стінові блоки на основі бариту та магнетиту мають значний потенціал для використання в спорудах спеціального призначення завдяки поєднанню високих радіаційно-захисних і механічних властивостей. Дослідження показало, що довговічність таких матеріалів залежить не лише від складу суміші, а й від впливу зовнішніх чинників, зокрема температурних коливань, вологості, циклів замерзання-відтавання та агресивності середовища в різних регіонах України. Узагальнення нормативних вимог дозволило



систематизувати основні критерії оцінювання надійності композитних блоків, серед яких міцність, морозостійкість, водопоглинання, стабільність густини та ефективність радіаційного захисту.

Проведений аналіз сучасних методів прогнозування засвідчив, що найбільш точні результати забезпечує комплексне використання статистичних моделей, пришвидшених випробувань, імітаційного моделювання та алгоритмів машинного навчання. Водночас встановлено, що достовірність прогнозів здебільшого визначається врахуванням кліматичних особливостей регіону та виробничої варіабельності матеріалів. Це підтверджує необхідність поєднання лабораторних досліджень, систематичного моніторингу та стандартизованих процедур контролю якості.

Практична цінність дослідження полягає в розробленні рекомендацій щодо вдосконалення системи прогнозування довговічності баритомагнетитових блоків в умовах різних кліматичних зон України. Обґрунтовано доцільність використання неруйнівних методів контролю, цифрових двійників і сенсорних систем моніторингу, які дозволяють оперативно відстежувати зміни експлуатаційних характеристик матеріалу протягом усього терміну служби. Це створює підґрунтя для більш обґрунтованого проектування радіаційно-захисних споруд, оптимізації витрат на їх експлуатацію та підвищення загального рівня безпеки будівельних об'єктів.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з необхідністю створення комплексних галузевих баз даних про експлуатаційні властивості баритомагнетитових композитів в умовах різних регіонів України, стандартизації протоколів випробувань у регіональних лабораторіях відповідно до європейських норм, розроблення специфічних для України моделей деградації, які враховують локальні кліматичні особливості та промислові навантаження, а також удосконалення методів статистичного контролю виробничої варіабельності для підвищення точності прогнозів при проектуванні об'єктів атомної енергетики та медичних радіологічних центрів.



Список використаних джерел

1. Badarloo B., Lehner P., Bakhtiari Doost R. Mechanical Properties and Gamma Radiation Transmission Rate of Heavyweight Concrete Containing Barite Aggregates. *Materials*. 2022. Vol. 15, № 6. Art. 2173. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15062173>
2. Lehner P., Gołaszewski J. Relationship of Different Properties from Non-Destructive Testing of Heavy Concrete from Magnetite and Serpentine. *Materials*. 2021. Vol. 14, № 15. Art. 4288. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14154288>
3. Valizadeh A., Aslani F., Asif Z., Roso M. Development of Heavyweight Self-Compacting Concrete and Ambient-Cured Heavyweight Geopolymer Concrete Using Magnetite Aggregates. *Materials*. 2019. Vol. 12, № 7. Art. 1035. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12071035>
4. Recent Trends in Advanced Radiation Shielding Concrete for Construction of Facilities: Materials and Properties / M. Abdullah et al. *Polymers*. 2022. Vol. 14, № 14. Art. 2830. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14142830>
5. Józwiak-Niedźwiedzka D., Glinicki M. A., Gibas K., Baran T. Alkali-Silica Reactivity of High Density Aggregates for Radiation Shielding Concrete. *Materials*. 2018. Vol. 11, № 11. Art. 2284. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11112284>
6. Eltawil K. A., Mahdy M. G., Youssf O., Tahwia A. M. Producing Heavyweight High-Performance Concrete by Using Black Sand as Newly Shielding Construction Material. *Materials*. 2021. Vol. 14, № 18. Art. 5353. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14185353>
7. Hosseinzadeh M., Samadvand H., Hosseinzadeh A., Dehestani M. Concrete Strength and Durability Prediction through Deep Learning and Artificial Neural Networks. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2024. Vol. 18. P. 1540–1555. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11709-024-1124-9>



8. Keshtegar B., Gholampour A., Ozbakkaloglu T., Zhu S.-P., Trung N.-T. Reliability Analysis of FRP-Confined Concrete at Ultimate Using Conjugate Search Direction Method. *Polymers*. 2020. Vol. 12, № 3. Art. 707. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12030707>
9. Amin H. K. A., El-Samrah M. G., Amer N. H., Tawfic A. F., Ali M. A. E. M. Synergetic Static and Radiation Shielding Characteristics of Non-Conventional Concrete Mixtures. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 42944. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-28121-3>
10. Krivenko P., Gots V., Petropavlovskiy O., Rudenko I., Konstantynovskiy O., Kovalchuk A. Development of Solutions Concerning Regulation of Proper Deformations in Alkali-Activated Cements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 5. № 6(101). P. 24–32. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.181150>.
11. Krivenko P. V., Petropavlovskiy O. M., Rudenko I. I., Konstantynovskiy O. P., Kovalchuk A. V. Complex Multifunctional Additive for Anchoring Grout Based on Alkali-Activated Portland Cement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 907. Art. 012055. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/907/1/012055>
12. Ivashchyshyn H., Sanytsky M., Kropyvnytska T., Rusyn B. Study of Low-Emission Multi-Component Cements with a High Content of Supplementary Cementitious Materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4. № 6(100). P. 39–47. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.175472>
13. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Heviuk I., Sikora P., Braichenko S. Development of Rapid-Hardening Ultra-High Strength Cementitious Composites Using Superzeolite and N-C-S-H-PCE Alkaline Nanomodifier. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 5, № 6 (113). P. 62–72. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242813>



14. Kroviakov S., Volchuk V., Zavaloka M., Kryzhanovskyi V. Search for Ranking Approaches of Expanded Clay Concrete Quality Criteria. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 968. P. 20–25. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.20>
15. Smerichevskiy S., Mykhalchenko O., Poberezhna Z., & Kryvovyazyuk I. Devising a systematic approach to the implementation of innovative technologies to provide the stability of transportation enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 3. №13 (123). P. 6–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.279100>
16. Hrechka U. Integration of AR and VR into Architectural Design and Spatial Solution Verification Processes. *Emerging Frontiers Library for The American Journal of Interdisciplinary Innovations and Research*. 2025. Vol. 7, № 12. P. 48–60. URL: <http://emergingsociety.org/index.php/eftajir/article/view/632> (дата звернення: 06.03.2026).
17. Sokolenko A. Comparative analysis of the factors of price competitiveness of niche ecoproducts on marketplaces in the United States and the European Union. *Актуальні питання економічних наук*. 2026. № 21. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.19592973>
18. Recent Trends in Advanced Radiation Shielding Concrete for Construction of Facilities: Materials and Properties / M. Abdullah et al. *Polymers*. 2022. Vol. 14, № 14. Art. 2830. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14142830>
19. ДСТУ Б В.2.7-187:2009. Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск. [Чинний від 2010-01-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. URL: https://dbn.at.ua/_ld/0/47_Bud_Katalog_by_.pdf (дата звернення: 06.03.2026).
20. ДСТУ Б В.2.7-49-96. Будівельні матеріали. Бетони. Прискорені методи визначення морозостійкості при багаторазовому заморожуванні та



відтаванні. [Чинний від 2009-01-01]. Київ: Держбуд України, 1997.
URL: https://dbn.at.ua/_ld/0/47_Bud_Katalog_by_.pdf (дата звернення: 06.03.2026).

21. ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності. [Чинний від 2009-07-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 28 с. URL: https://dbn.at.ua/_ld/0/47_Bud_Katalog_by_.pdf (дата звернення: 06.03.2026).

22. ДСТУ Б В.2.7-7:2008. Будівельні матеріали. Вироби бетонні стінові. Технічні умови. [Чинний від 2009-01-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 52 с. URL: https://dbn.at.ua/_ld/0/47_Bud_Katalog_by_.pdf (дата звернення: 06.03.2026).

23. IAEA. Ageing management of concrete structures in nuclear power plants: IAEA Nuclear Energy Series № NP T 3.5. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2016. 196 p. URL: <https://www.iaea.org/publications/10905/ageing-management-of-concrete-structures-in-nuclear-power-plants> (дата звернення: 06.03.2026).

24. Tipnis A. Most Probable Point Based Design Optimization. Master of Science (MS), Thesis, Mechanical & Aerospace Engineering, Old Dominion University, 2006. DOI: <https://doi.org/10.25777/qmbg-8w33>

25. Concrete Baryte – Nuclear Shielding Attenuation. *Engineering Database*. URL: <https://engdatabase.com/data/nuclear-shielding-attenuation/concretebaryte> (дата звернення: 06.03.2026).

26. EN 12504-4:2021. Testing concrete in structures – Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity. Brussels: CEN, 2021. 20 p. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/68189/f0258fd115184ee6b0e678a3d6aa334b/SIST-EN-12504-4-2021.pdf> (дата звернення: 06.03.2026).