

*Б. Ю. ГАЛАЙКО, О. В. ХРИСТИЧ*

## **БЕТОНИ ДЛЯ ПІДЗЕМНИХ КОНСТРУКЦІЙ: СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ФОРМУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА РЕГІОНАЛЬНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ (ХАРКІВЩИНА)**

Метою дослідження є оцінювання технічного стану існуючих підземних захисних споруд в Україні з позицій експлуатаційної придатності матеріалів та обґрунтування технологічних підходів до їх модернізації або заміни на основі сучасних рішень хімічної інженерії, спрямованих на забезпечення довговічності та надійності експлуатації. Дослідження ґрунтується на аналізі матеріалів конструкцій підземних споруд, зведених у другій половині ХХ століття, з акцентом на цементні композити, системи армування та гідроізоляційні покриття. Оцінювання здійснювалося з урахуванням фізико-хімічних процесів деградації, зокрема карбонізації, хлоридної корозії сталевих арматур, міграції вологи, морозного руйнування та хімічної корозії. Проведено порівняльний аналіз експлуатаційних характеристик існуючих конструкцій і сучасних підземних споруд, у яких застосовуються високоміцні бетони, модифіковані в'язучі системи, корозійностійка арматура та полімерні гідроізоляційні матеріали. Встановлено, що тривала експлуатація підземних споруд супроводжується прогресуючою деградацією мікроструктури цементного каменю, зниженням несучої здатності внаслідок корозії арматури, підвищенням проникності та втратою захисних властивостей гідроізоляційних систем. Застарілі склади матеріалів і технологічні підходи не забезпечують необхідного рівня довговічності в сучасних умовах експлуатації. Використання високо- та надвисокоміцних бетонів, мінеральних активних добавок, кристалічних гідроізоляційних модифікаторів та систем інгибування корозії суттєво підвищує стійкість конструкцій до дії агресивних чинників і сприяє подовженню терміну їх служби.

**Ключові слова:** підземні захисні споруди, високоефективний бетон, цементні матеріали, довговічність, корозія арматури, гідроізоляційні системи, фізико-хімічна деградація, термін служби.

*B. Yu. HALAIKO, O. V. KHRYSTYCH*

## **CONCRETE FOR UNDERGROUND STRUCTURES: CURRENT TRENDS IN PROPERTY FORMATION AND REGIONAL ASPECTS OF APPLICATION (KHARKIV REGION)**

This study aims to evaluate the durability performance of materials used in existing underground protective shelters in Ukraine and to substantiate material-oriented technological approaches for their renovation or replacement based on contemporary chemical engineering solutions. The research comprises an analytical assessment of cement-based materials, reinforcement systems, and waterproofing systems applied in underground shelters constructed in the second half of the twentieth century. Particular attention is paid to physicochemical degradation mechanisms, including carbonation of the cementitious matrix, chloride-induced reinforcement corrosion, moisture transport, freeze-thaw deterioration, and sulfate attack. A comparative analysis was conducted between aging structures and modern underground facilities incorporating high-performance concrete, supplementary cementitious materials, corrosion-resistant reinforcement, crystalline waterproofing admixtures, and polymer-modified protective systems. The findings indicate that long-term service under aggressive environmental exposure leads to progressive microstructural degradation of the cementitious matrix, increased permeability, loss of protective capacity, and reduction in structural reliability due to reinforcement corrosion. Legacy material compositions and construction technologies do not ensure adequate durability under current service conditions. The implementation of advanced concrete technologies, optimized binder systems, and integrated waterproofing solutions significantly improves resistance to physicochemical attack and extends service life. The study systematizes material degradation mechanisms in underground protective structures and establishes durability-based criteria for decision-making regarding modernization, rehabilitation, or new construction within civil protection infrastructure.

**Keywords:** underground protective structures, high-performance concrete, cementitious materials, durability performance, reinforcement corrosion, waterproofing systems, physicochemical degradation, service life.

**Вступ.** Система підземних захисних споруд є важливим елементом інфраструктури цивільного захисту та безпеки населення. Значна частина існуючих підземних сховищ в Україні була зведена у другій половині ХХ століття та розрахована на нормативні вимоги того часу. У сучасних умовах більшість таких об'єктів характеризується суттєвою фізичною зношеністю, моральним старінням конструктивних рішень та невідповідністю актуальним нормативним стандартам. Крім того, частина споруд змінила функціональне призначення або втратила експлуатаційну придатність. З огляду на підвищені вимоги до безпеки, стійкості та довговічності інженерних систем актуалізується проблема технічної оцінки існуючого фонду та розроблення науково обґрунтованих підходів до

створення нових матеріалів для підземних споруд. Це зумовлює необхідність комплексного аналізу технічного стану сховищ та формування сучасних принципів їх проектування і модернізації.

У сучасних умовах підвищених техногенних і воєнних ризиків забезпечення надійності захисних споруд цивільного захисту є одним із пріоритетних напрямів розвитку будівельної галузі України. Введення в дію державного будівельного нормативу ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту» [1] встановлює сучасні вимоги до проектування, будівництва та реконструкції сховищ, протирадіаційних укриттів і споруд подвійного призначення із захисними властивостями сховищ. Реалізація цих вимог потребує застосування конструкційних матеріалів із підвищеною

довговічністю, водонепроникністю та стійкістю до фізико-хімічних впливів. Особливого значення набуває вибір складу бетону для підземних споруд подвійного призначення, які повинні забезпечувати комплексний захист від механічних, гідростатичних і корозійних впливів протягом тривалого терміну експлуатації. Довговічність таких конструкцій значною мірою визначається мікроструктурою цементного каменю, проникністю бетону та його стійкістю до агресивних середовищ.

Гідрогеологічні умови Харківська область характеризуються високим і змінним рівнем ґрунтових вод, наявністю гідростатичного тиску, агресивним хімічним складом підземних вод та нестабільними ґрунтовими умовами. Це створює передумови для розвитку процесів проникнення вологи, сульфатної корозії цементного каменю, корозії арматури та зниження несучої здатності конструкцій. У таких умовах ключову роль відіграє застосування бетонів із модифікованою мікроструктурою, зниженим водоцементним відношенням, підвищеною щільністю та стійкістю до фізико-хімічної деградації.

З позицій хімічної технології та інженерії підвищення довговічності бетонів досягається шляхом оптимізації фазового складу цементного каменю, використання мінеральних і наномодифікуючих добавок, а також застосування сучасних технологічних підходів, спрямованих на формування щільної та стабільної мікроструктури матеріалу.

Аналіз останніх сучасних досліджень та публікацій авторів Rawat A., Joshi B. та Garg N., а також Paul A. та John E. демонструють сталий перехід у будівництві до ультрависокоміцних бетонів (UHPC) з екстремально низьким водо-цементним відношенням (0,16–0,25) [2, 3]. Для оптимізації матриць, автори - Lv Z., Zhang M. та Sun Y. пропонують модифікацію наночастинками  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , що підвищує стійкість в агресивному середовищі, тоді як дослідники Shah A. та Khan S. наголошують на важливості використання полікарбоксилатних суперпластифікаторів задля забезпечення реології сумішей [4, 5].

Окремий напрям досліджень присвячено підвищенню довговічності та тріщиностійкості. Вчені Ammar M.A. та Chegenizadeh A. обґрунтували ефективність введення кристалічних добавок, які забезпечують ефект самолікування бетону [20]. Водночас Anas M. та Khan M. узагальнили методи дисперсного армування, підтвердивши, що введення фібри є необхідною умовою для нівелювання крихкості високоміцних композитів [5, 7].

Автори Anas M. та Khan S. вказують на обмеженість даних щодо ефективності синтетичних волокон при динамічних навантаженнях [7]. Не повною мірою дослідженим залишається питання оптимізації складів еко-бетонів із використанням відходів промисловості для будівництва підземних

конструкцій, що й обумовлює актуальність, наукову та практичну значущість обраної теми.

**Мета дослідження:** наукове обґрунтування та аналіз сучасних технологій бетонів для підземних конструкцій та їх застосування в Харківському регіоні України для підземних цивільних захисних споруд з урахуванням підвищених ризиків в умовах воєнного стану.

Практичне значення проведеного огляду полягає у систематизації сучасних науково-технічних підходів до формування складу бетонів підвищеної довговічності для підземних споруд цивільного захисту. Отримані узагальнення можуть бути використані при розробленні проєктних рішень, враховані при вдосконаленні державних будівельних норм, при реконструкції існуючих об'єктів цивільного захисту, а також під час вибору складів і технологій виготовлення бетонів, що відповідають сучасним вимогам міцності, водонепроникності, морозостійкості й довговічності.

**Матеріали та методи дослідження.** Матеріалами дослідження виступали сучасна українська та закордонна наукова література, державна нормативна база з питань розробки ефективних будівельних матеріалів для забезпечення надійності захисних споруд цивільного захисту.

Дослідження проводиться шляхом порівняння та систематизації складу, фізичних властивостей і технологічних особливостей виготовлення композитних матеріалів у провідних країнах світу. Важливим елементом методики є аналіз інженерно-геологічних умов Харківської області, зокрема впливу рівня ґрунтових вод, їхнього хімічного складу та поведінки лесових ґрунтів, що визначає специфічні вимоги до матеріалів. У роботі застосовується метод критичного аналізу вимог [1, 8]. На основі узагальнення теоретичних даних та закордонного практичного досвіду будівництва сформовані рекомендації вдосконалення технологій виготовлення бетонів для забезпечення підвищеної стійкості та довговічності підземних захисних споруд із використанням переважно української сировини

**Результати та обговорення.** Зведення підземних споруд характеризується комплексом інженерно-геологічних та фізико-хімічних факторів, які визначають підвищені вимоги до матеріалів, технології та конструктивних рішень. Серед ключових чинників, що впливають на надійність і довговічність таких об'єктів: гідростатичний тиск, агресивність ґрунтових вод, температурно-вологісний режим та необхідність забезпечення тріщиностійкості й довговічності бетонних елементів.

**Теоретичні основи та вимоги до бетонів для підземних конструкцій.** Основним параметром, що визначає стійкість бетону, є його мікроструктура, яка формується співвідношенням компонентів і технологією тверднення. Зниження водоцементного відношення до 0,25–0,40 сприяє формуванню щільної

структури цементного каменю з низькою проникністю та високою корозійною стійкістю.

До початку російської збройної агресії для будівництва захисних споруд цивільного захисту використовувалися ДБН В.2.2–5–97 «Будинки та споруди. Захисні споруди цивільного захисту» [9]. На його зміну сформовано нові ДБН В.2.2–5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту» [1]. Документ регулює проектування та будівництво сховищ, протирадіаційних укриттів і споруд подвійного призначення. Також він визначає розміщення, конструктивні, інженерні вимоги, параметри захисних властивостей, умови експлуатації та просторові показники. Норми застосовуються під час нового будівництва та реконструкції до старих споруд.

Попри багатогранність вимог, що надає цей стандарт, він не розкриває повну характеристику бетону, надаючи лише параметри міцності на стиск, морозостійкості та водонепроникності. Норми ДБН В.2.6–98:2009 «Бетонні та залізобетонні конструкції» [8] розглядають класифікацію бетонів за складом і властивостями, правила підбору бетонної суміші, норми розрахунку міцності, тріщиностійкості та деформації елементів, умови роботи бетонних конструкцій у різних середовищах, вимоги до тривалості витримування навантажень, якості матеріалів, методів контролю тощо.

Розглянемо класифікацію укриттів для розуміння необхідних фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей бетону. Захисні споруди цивільного захисту поділяють на: сховища та протирадіаційні укриття, при чому обидві конструкції мають бути спорудами подвійного призначення для мирного часу. Сховища призначені для захисту від ударної хвилі (від 100 до 500 кПа), уламків, дії небезпечних хімічних речовин, катастрофічного затоплення та дії високих температур, через що мають підвищені вимоги до міцності, герметичності, систем життєзабезпечення. Протирадіаційні укриття мають призначення для захисту переважно від іонізуючого випромінювання та радіоактивного забруднення, тому для них є нижчі конструктивні вимоги (захист від ударної хвилі 100 кПа) [1]. Споруди подвійного призначення діють як об'єкти повсякденного використання (школи, магазини, лікарні), а під час надзвичайної ситуації – у режимі захисних споруд.

Визначити захист від агресивного середовища (для оцінки впливу ґрунтів) можна за допомогою стандарту ДСТУ Б В.2.6–145:2010 «Конструкції будинків і споруд. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. Загальні технічні вимоги» [10]. В Додатку Г приведені таблиці стосовно бетону для відповідних агресивних середовищ.

**Оцінка небезпечних впливів на експлуатаційні характеристики бетонних будівельних споруд Харківщини.** Гідрогеологічні умови: рівень ґрунтових вод на Харківщині коливається 1,5–5 м, в долинах річок піднімається до 0,5–1,0 м. На піщаних та супіщаних масивах – ризик підтоплення та високий

гідростатичний тиск. У глинах тиск також значний через відсутність дренажу [11]. Весняний паводок може піднімати рівень води на 0,5–1,2 м.

За характером впливу підземних вод на об'єкти будівництва виділяють дві групи: прямий і непрямий вплив. До прямого впливу відносяться: затоплення заглиблених частин споруд, комунікацій, будівельних ям; корозія матеріалів підземних споруд; погіршення екологічних та санітарних умов територій і ділянок; засолення ґрунтів; явища, пов'язані з гідростатичним і гідродинамічним тиском підземних вод [12]. Впливи непрямого характеру проявляються через зміну міцнісних і деформаційних властивостей ґрунтів, що обумовлено розвитком карстових процесів, підтопленням територій, зсувними та обвальними явищами, набуханням глинистих ґрунтів, морозним пученням, а також виникненням ефекту плавучості.

Одним із критичних ризиків для підземних споруд у Харкові є високий рівень ґрунтових і підземних вод в окремих районах, що створює постійний гідродинамічний тиск на підземні споруди. У таких умовах існує можливість «флотування» (спливання) споруд – коли через тиск підземних вод підземна конструкція може втратити стійкість, якщо не забезпечено водонепроникність і протидренажні заходи. Існує також ефект створення «бар'єру» підземною спорудою природного русла підземних вод [13]. Споруда може порушити природний водопріток, що призведе до підвищення напору, витіснення або застою води, що підсилить навантаження на огорожувальні конструкції.

Підземні конструкції постійно зазнають впливу гідростатичного тиску з боку ґрунтових вод, величина якого зростає зі збільшенням глибини та водонасиченості порід. В таких умовах бетонні елементи мають працювати як бар'єр, що перешкоджає проникненню води всередину споруди. Це потребує застосування бетонів з низькою проникністю, ущільненою мікроструктурою та використанням гідроізоляційних систем. Надійність роботи конструкції залежить від якості монолітності, оскільки люба локальна зона зниженої щільності може стати каналом водонепроникнення.

Підтоплення потребує використання бетону із захистом водонепроникності W8–W12, а для зон із високим гідростатичним тиском – W14–W20. Це забезпечує мінімальну проникність води; стійкість проти фільтрації крізь мікропори; захист арматури від корозії. Застосовуються добавки: гідрофобізатори; мікрокремнезем; полімерні пластифікатори; кристалізуючі добавки (Penetron Admix, Хурех) [14].

**Хімічна агресія:** хімічний склад ґрунтових вод часто містить компоненти, що спричиняють корозійне руйнування бетонних конструкцій. Найпоширеніші види агресії є: сульфатна корозія (призводить до розширення та тріщиноутворення цементного каменю), хлоридна корозія (прискорює процеси корозії арматури та знижує несучу здатність конструкцій), кислотна агресія (розчиняє гідратні

продукти цементу та руйнує поверхневі шари бетону) [15].

На Харківщині переважно присутні змішані гідрокарбонатно-сульфатні води, а також локальні ділянки хлоридних (заплави). У глинах та суглинках часто виявляються підвищені концентрації  $\text{SO}_4$ , тому є ризик сульфатної корозії бетону. Зважаючи на це для підземних конструкцій рекомендується використовувати сульфатостійкий цемент (CEM I 42.5 SR, CEM III/A, ПЦ 400–500), клас W10+, F200–F300 [17].

Хлоридна агресія вимагає збільшення захисного шару арматури у межах 40–50 мм, використання антикорозійних покриттів (цинкове покриття, епоксидні системи). Кислотна корозія характерна для районів із торфовищами, промисловими стоками. В цих умовах звичайний бетон руйнується, отже потрібні полімерні цементні суміші, додавання мікрокремнезему, латексів.

*Характеристика ґрунтів:* режим ґрунтової вологоти та рівень підземних вод є динамічними та змінюються під впливом сезонних коливань, а також техногенних факторів. Підземні споруди знаходяться в умовах, де зміна вологості ґрунтів може спричинити як надмірне насичення, так і процеси зневоднення. Такі зміни супроводжуються деформаціями ґрунтової основи, що впливає на експлуатаційну надійність споруд. Підземні води існують у всіх фізичних станах: від гравітаційної до капілярної та парової, це визначає складний вплив на ґрунт та конструкцію.

Температурно-вологісний режим Харківщини взимку характеризується глибиною промерзання 1,0–1,2 м (до 1,4 м у сухі роки). На глибинах 2–4 м температура стабільна: +6...+10 °С. Вологість повітря в ґрунтовому просторі може досягати 80–95 %, що вимагає вентиляції. Ґрунти при промерзанні дають морозне здимання, особливо лесові, суглинки пластичні, супіски. У районах із сезонним промерзанням ґрунту бетон може зазнавати циклів заморозування-відтавання, що становить ризик для конструкцій із недостатньою морозостійкістю або порушеним формуванням структури. Через постійну вологість підвищується ймовірність капілярного проникнення, що потребує застосування гідрофобних добавок, ущільнення структури бетону та ретельної зовнішньої гідроізоляції.

На ділянках, де відбувалося осушення ґрунту, існує ризик дегідратації та повторного зволоження, що може призвести до просідань, деформацій ґрунту, зміни несучості, впливати на довговічність конструкцій. Також при перетинах із техногенними насипами, заповненнями, в урвищах, балках чи ярах – зміна вологості ґрунту може бути різкою і нерівномірною, що створює додаткові геовакуумні, фільтраційні та деформаційні ризики для підземних споруд [13].

Важливим фактором є характеристика ґрунтів Харківської області та їхня поведінка у підземному

будівництві. Для центральної та південної частин регіону типовими ґрунтами є леси та лесоподібні суглинки. Вони визначаються низькою природною вологістю, але різко змінюють властивості при контакті з водою. Ці ґрунти схильні до просаджування при зволоженні. Проте модуль деформації середній, тому потребують ущільнення та бетонних конструкцій із високою жорсткістю. Майже вся територія області містить суглинки, супіски, глини. Це найпоширеніші інженерно-геологічні ґрунти. Глини середньої та тугопластичної консистенції дають хорошу природну водонепроникність. Підземні споруди в глинах мають меншу фільтрацію, але високий боковий тиск. Долини річок Уди, Лопані, Сіверського Дінця містять піски дрібні та пилюваті. Вони характеризуються високою проникністю, тому існує небезпека підтоплення [17]. Локальні ділянки заповнені торфом та органічні слабкі ґрунти, які непридатні для використання без заміни або глибокого фундаменту.

Підземні споруди проєктуються з розрахунком на тривалі терміни експлуатації 50–100 років і більше. Це зумовлює необхідність забезпечення високої довговічності бетонних елементів та їх здатності протистояти руйнівним процесам протягом усього життєвого циклу. Однією з ключових властивостей є тріщиностійкість, адже незначні тріщини можуть стати шляхами проникнення води та агресивних іонів, що прискорює корозію арматури та руйнування бетону. Це забезпечується армуванням, контролем усадки, пластифікаторами, мінеральними добавками, оптимізацією температурних і деформаційних швів.

Отже, для Харківської області характерні підвищені вимоги до конструктивної стійкості, герметичності, стійкості до тріщин, деформацій, водовпливів, підвищених навантажень від тиску води або зміни ґрунту. Конструкції мають витримувати не лише статичні навантаження, але й динамічні, часті зміни гідростатичного й гідродинамічного режимів, а також тривалу експлуатацію у вологому середовищі.

*Сучасні тенденції розвитку бетону для підземних конструкцій* Європейські стандарти у сфері будівельних матеріалів значну увагу приділяють зменшенню екологічного навантаження на всіх етапах життєвого циклу бетону — від виробництва складників до експлуатації та подальшого рециклінгу. Ключовим принципом є концепція сталого будівництва, яка передбачає скорочення споживання природних ресурсів, зниження викидів парникових газів і мінімізацію утворення відходів.

У процесі виготовлення складників бетону європейські нормативи заохочують часткову заміну цементу мінеральними добавками техногенного походження, такими як доменний гранульований шлак, зола-винесення або мікрокремнезем. Це дозволяє суттєво зменшити вуглецевий слід цементного виробництва, яке є одним із найбільш енергомістких та екологічно навантажених процесів у

будівельній галузі. Додатки підвищують довговічність бетонів, що відповідає вимогам європейських стандартів подовження терміну служби конструкцій як одного з чинників екологічної ефективності.

Важливим напрямом є використання вторинних матеріалів і рециклінг. Європейські стандарти допускають застосування перероблених заповнювачів із будівельних відходів за умови забезпечення стабільних фізико-механічних характеристик і довговічності бетону. Такий підхід сприяє зменшенню обсягів відходів, що захоронюються, та зниженню потреби у видобутку природних заповнювачів, що позитивно впливає на стан довкілля. Зменшення навантаження на довкілля відбувається завдяки технологіям модифікації бетону із застосуванням наночастинок і високоефективних хімічних добавок.

Тобто, екологічна складова в європейських стандартах розглядається не ізольовано, а як частина комплексного підходу до проектування, виготовлення та експлуатації бетонних конструкцій.

Україна поступово наближається до екологічних вимог європейських стандартів у сфері будівельних матеріалів в умовах воєнного часу. Відбувається адаптація національної нормативної бази до європейських підходів. Хоча екологічні показники ще не завжди прямо нормуються, вони опосередковано враховуються через вимоги до водонепроникності, морозостійкості, тріщиностійкості та терміну служби бетонів. Рециклінг будівельних матеріалів, повторне використання бетонного бою як заповнювача в некритичних конструкціях, допоміжних шарах набув актуальності у контексті відновлення зруйнованої інфраструктури, де напрям розглядається як спосіб одночасного зменшення відходів і дефіциту сировини.

Зростає інтерес до високоефективних і модифікованих бетонів, зокрема із застосуванням наночастинок і сучасних хімічних добавок. Процес наближення до європейських екологічних вимог формує підґрунтя для подальшої інтеграції європейських принципів сталого будівництва в національну практику.

*Високоефективний бетон* характеризується довговічністю, високою міцністю на стиск понад 60 МПа, достатньою оброблюваністю, низькою проникністю, стійкістю до хімічного впливу, пружністю. Високоефективний бетон передбачає використання додаткових цементних матеріалів, таких як зола та доменний шлак, а також хімічних добавок, таких як суперпластифікатор, на додаток до трьох основних компонентів звичайного бетону. Додаткові матеріали використовуються як часткові заміники портландцементу [2]. Вони допомагають захищати довкілля шляхом переробки промислових відходів, мінімізації шкідливих викидів в атмосферу при виробництві цементу, захисту сировини та збереження енергії. Додавання сталевих волокон підвищує міцність на стиск, а поліпропіленових

волокон – міцності на згин і розрив. Синтетичні волокна запобігають виникненню та поширенню тріщин.

*Надвисокоефективний бетон* виготовляється на основі цементу з міцністю на стиск понад 150 МПа, відмінною в'язкістю, високою непроникністю та стійкістю до корозії. Він забезпечує функціонування вибухобезпечних конструкцій, завдяки високій міцності, ударостійкості, що дозволяє витримувати екстремальні навантаження. Бетон має також хорошу міцність на згин і розтягнення завдяки наявності волоконних матеріалів. Реактивний бетон – це тип надвисокоміцного бетону, міцність якого становить від до 200 МПа. Для виготовлення реактивного порошкового бетону потрібно вдвічі більше цементу, ніж у стандартній суміші. Надвисокоефективний бетон вимагає низького співвідношення вода/цемент 0,10–0,25. Зола, шлак або подрібнений кварц можуть бути використані як заміники частини цементу [3].

Дозування суперпластифікатора залежить від інгредієнтів та їх сумісності з ним. Для досягнення кращої міцності зчеплення обирають заповнювачі: кварцовий пісок, природний пісок та залізні відходи. Чим більша міцність бетону, тим більша його крихкість [5]. Для подолання її використовують фібру. Додавання наночастинок оксиду алюмінію  $Al_2O_3$ , оксиду цирконію, діоксиду кремнію  $SiO_2$ , оксиду заліза дозволяє заповнити простір між цементним матеріалом і дрібним заповнювачем, щоб досягти високої щільності та мінімізувати пори у кінцевій бетонній суміші. Додавання волокон до бетону дозволяє досягти вищої міцності на стиск.

*Самовідновлювальний бетон* заповнює тріщини за допомогою мікробних або капсульних механізмів. Використаний у підземних конструкціях, він може подовжити термін служби її та зменшити витрати на обслуговування. У звичайному бетоні 20–30 % цементу залишається негідратованим. Якщо бетон тріснув, то негідратовані частинки цементу вступають в реакцію з потраплянням води. Починається процес гідратації та заповнюються тріщини його продуктами. Цей процес відомий як аутогенне зцілення, яке загоє тріщини шириною від 200 до 300 мкм [18].

Автономне загоєння тріщин – це результат штучно запущених процесів самовідновлення в цементній матриці бетону шляхом впровадження хімічних речовин або біологічних агентів. Трубочасті мережі та капсули можуть бути використані для доставки зовнішніх агентів. Цілющі речовини вивільняються з контейнерів, коли відбувається пошкодження у вигляді тріщини, та реагують на певні подразники, викликаючи активацію процесу самовідновлення. Загоєвальний засіб може реагувати, коли він піддається впливу повітря, вологи або тепла або коли він вступає в контакт з цементною матрицею. Автономне загоєння може виправляти тріщини шириною 500–970 мкм. В процесі виготовлення бетону використовуються

ультразвукова обробка, суперпластифікатори, водоредуруючі добавки.

При інкапсуляції мікробів *Bacillus sphaericus*, *Pseudo firmus* та *Pseudomonas aeruginosa* в самовідновлювальний бетон, отримуємо перевагу методики через те, що вона екологічно чиста і сумісна з цементною матрицею [18]. Серед недоліків: вона дороговартісна, повторюваність циклів відновлення залежить від продуктивності біоти й вологи. Однак виживання бактерій після введення в бетон все ще невідоме, нема інформації про бактеріальний спосіб життя в бетонній матриці.

*Самоущільнювальні бетони* ідеальні для густоармованих конструкцій, вони забезпечують якість бетону без вібрування. Консистенція рідини суміші досягається завдяки великій кількості в'язучого та додаванню суперпластифікатора на основі полікарбонатів та поліефірів. Низька пористість досягається за рахунок зменшення кількості води, доданої до бетону, і наявності дрібнозернистих мінеральних добавок. Дрібні фракції щільно заповнюють повітряні проміжки між цементними зернами. Після укладання бетон самовирівнюється, що призводить до гладкої поверхні. Усувається процес механічної вібрації та шуму. Бетони, що самоущільнюються, мають довговічність і міцність у межах 30–100 МПа [19]. Зниження дифузії іонів хлориду забезпечує більшу довговічність і захист арматури.

*Волокнисто-армований бетон* містить волокна для покращення міцності та стійкості до тріщин, підвищення міцності на розтяг та удар, а також запобігання поширенню тріщин. Використання сталевих волокон підвищує міцність на стиск та на згин бетону. При цьому знижується оброблюваність бетону, тому необхідно використовувати суперпластифікатори. Додавання скловолокна до бетону підвищує міцність на розрив і зменшує потребу в сталевій арматурі. Скловолокна покращують витривалість, підвищують міцність на згин і порушують структуру тріщин, зменшуючи їх ширину. Скловолокнистий бетон має хороші показники ударостійкості та поглинає більше енергії. Використання промислових відходів скла – це ефективний засіб утилізації.

Завдяки додаванню поліпропіленового волокна забезпечується краща стійкість до хімічних і бактеріальних впливів. Використання пластикового волокна, як армуючого матеріалу, робить конструкцію екологічно чистою. До того, вартість будівництва зменшується при заміні цементу відходами пластика.

*Самоочисний бетон* – це різновид еко-бетону, який використовує фотокаталітичні властивості діоксиду титану. Наночастинки діоксиду титану сприяють розвитку високоефективних, довговічних, екологічно чистих бетонів. Оксид титана ( $\text{TiO}_2$ ) є багатофункціональним матеріалом за рахунок його фізико-хімічних властивостей. У присутності

ультрафіолетового випромінювання, кисню та води відбувається серія фотохімічних поверхневих реакцій, що призводить до здатності окиснювати  $\text{NO}_x$ , летючі органічні сполуки та неорганічні сполуки. Включення  $\text{nanoTiO}_2$  в бетон зменшує пористість, одночасно зменшуючи вміст клінкеру. Наночастинки сприяють ущільненню бетону. Підвищується температурна стійкість бетону до  $600\text{ }^\circ\text{C}$ , покращується міцність на стиск [20].

*Наномодифікований бетон* для покращення мікроструктури містить наноматеріали, підвищуючи компактність, міцність, довговічність, здатність до самовідновлення, протистоїть корозії. Нанокремнезем ( $\text{SiO}_2$ ) покращує міцність і зменшує пористість як пластичного, так і затверділого бетону. Включення наночастинок  $\text{SiO}_2$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в бетонні рецептури підвищує стійкість до заморожування і відтавання до 120 циклів та значно підвищує стійкість до атаки  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  за рахунок зменшення адсорбції солі.

*Сульфатостійкі бетони* використовують тоді, коли традиційні бетонні та армовані конструкції схильні до руйнування під впливом морських, річкових та ґрунтових вод. Для виробництва сульфатостійких бетонів застосовують спеціальні цементи, зокрема портландцемент з мінеральними добавками та шлакопортландцемент. Сульфатостійкі цементи мають мінеральний склад із низьким вмістом трикальцієвого алюмінату ( $\text{C}_3\text{A}$ ), що суттєво зменшує утворення шкідливих сульфатних продуктів [21]. Завдяки цьому бетон є більш стійким до дії сульфатів, має меншу схильність до набухання, розтріскування та втрати міцності, а також характеризується нижчою теплою гідратації та кращою довговічністю. Використання волокнистого бетону зменшує пористість і тріщиноутворення, що підвищує стійкість до сольових циклів заморожування/відтавання. Додавання наночастинок  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  та  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  покращує мікроструктуру бетону та зменшує проникнення хлоридів [4].

*У полімерцементних бетонах* цементна матриця модифікується або замінюється полімерною фазою. В них використовують синтетичні полімерні в'язучі та агрегатні частинки. В якості полімерних домішок застосовують: пластифікатори, волокна та повторно дисперговані порошки.

Включення полімерів у бетонну систему істотно впливає на мікроструктуру матеріалу. Полімерна фаза заповнює поровий простір, зменшує кількість відкритих капілярів і змінює властивості міжфазної зони між заповнювачем і в'язучим. У результаті формується однорідна та щільна структура. Це пояснює підвищення міцності на стиск, згин і розтяг, зростання тріщиностійкості. Полімерна матриця здатна перерозподіляти навантаження і стримувати розвиток мікротріщин [22].

Зміни мікроструктури відбиваються на довговічності бетону. Знижена проникність обмежує вплив води, іонів солей та агресивних хімічних речовин. Полімерна складова зменшує чутливість

матеріалу до циклічних температурних впливів для конструкцій, які експлуатуються в умовах змінного клімату або повторюваних заморожувань і відтавань.

Екологічний вимір полімерцементного бетону пов'язується з можливістю використання вторинних полімерів і пластикових відходів як складових. Комплексне рішення стійких полімерних композитів з різними компонентами відходів, ще не досягнуто, але концепція відкриває можливості для створення надійних і довговічних конструкцій у складних умовах експлуатації.

*Проникні (кристалізаційні) гідроізоляційні бетони* в складі мають матеріали, які утворюють нерозчинні кристали в порах, забезпечуючи самозаліковування тріщин. Кристалічні домішки вводяться під час приготування бетонної суміші або наносяться на поверхню готових конструкцій. Домішка полегшує утворення арагоніту, форми карбонату кальцію, в тріщинах на відміну від утворення кальциту, що спостерігається в бетоні без домішки. Хоча арагоніт формується з повільною швидкістю, він сприяє більш ефективній герметизації тріщин з часом. У результаті в бетонній матриці утворюються нерозчинні кристалічні структури, які заповнюють капілярні пори та мікротріщини. Це призводить до ущільнення структури бетону, зменшення його проникності та підвищення довговічності. У присутності вологи кристали здатні продовжувати ріст [6]. Завдяки цьому бетон краще захищений від проникнення води та агресивних хімічних речовин, що важливо для підземних і гідротехнічних споруд, а також конструкцій, які експлуатуються в складних кліматичних умовах.

Порівняльна характеристика бетонів для підземних захисних споруд представлена в таблиці 1.

**Особливості та обмеження застосування сучасних бетонів у гідрогеологічних умовах Харківської області.** Геологічні умови Харківської області ускладнюють експлуатацію підземних конструкцій. Високий рівень ґрунтових вод створює постійний гідростатичний тиск. Це підвищує ризик флотування споруд, коли підземна конструкція може втратити стійкість через виштовхувальну силу води. Ґрунти центральної та південної частин області – леси, які просаджуються при зволоженні, що вимагає від бетонних конструкцій високої жорсткості. Сезонне промерзання ґрунту впливає на руйнування бетону через заморожування/відтавання. Ґрунтові води мають гідрокарбонатно-сульфатний склад, а глини та суглинки містять підвищені концентрації сульфатів. Без захисту це призводить до сульфатної корозії та утворенню тріщин.

Чинна нормативна база стандартизації бетонів залишається фрагментарною. Сучасний стандарт регламентує загальні вимоги до захисних споруд цивільного захисту, окреслює показники міцності та водонепроникності бетону, тоді як питання вибору складів для агресивних середовищ віднесено до інших стандартів і подано недостатньо детально.

Суттєвою перешкодою для масового впровадження інноваційних рішень також є економічний чинник, оскільки будь-які новітні види бетону коштують дорожче за традиційні аналоги на основі портландцементу. Зокрема, вартість самовідновлювального бетону може перевищувати ціну звичайного на 30–50 %. Це створює додаткові обмеження для їх масштабного використання та вимагає пошуку оптимального балансу між покращенням експлуатаційних характеристик і економічною доцільністю будівництва. Можливе рішення - застосування мінеральних добавок, таких як зола-виносення та доменний шлак, що дозволяє зменшити витрати цементу та підвищити довговічність бетону. Використання вторинних матеріалів також сприяє зниженню екологічного навантаження та відповідає принципам сталого будівництва.

**Висновки та рекомендації.** З огляду на гідрогеологічні умови Харківської області, для підземних укриттів доцільно застосовувати бетони з підвищеною хімічною стійкістю, низькою проникністю та високою тріщиностійкістю. Базовим рішенням мають бути сульфатостійкі бетони, оскільки вони ефективно протидіють сульфатній і хлоридній корозії та зберігають міцність конструкцій при тривалому контакті з вологою. Їх доцільно поєднувати з проникними (кристалізаційними) гідроізоляційними системами, які ущільнюють структуру бетону, зменшують водопроникність та підвищують довговічність без значного впливу на довкілля. Додатковий захист забезпечать волокнисто-армовані бетони, що зменшують тріщиноутворення та підвищують стійкість до нерівномірних осідань, характерних для лесових ґрунтів. Доцільним є також використання високоефективних бетонів з низьким водоцементним відношенням і мінеральними добавками, що сприяють ущільненню структури й зниженню екологічного навантаження.

У разі наявності належного контролю можуть застосовуватися наномодифіковані бетони, які додатково зменшують проникність, проте повинні розглядатися лише як допоміжний елемент системи захисту. Самоущільнювальні та самовідновлювальні бетони доцільно розглядати як спеціалізовані технологічні рішення, тоді як надвисокоефективні та полімерцементні бетони, через високу вартість і матеріаломісткість, доцільні для локальних або спеціальних зон підземних укриттів.

Таким чином, вибір бетону для будівництва підземних укриттів для населення повинен ґрунтуватися на поєднанні експлуатаційних, геологічних умов та принципів екологічної безпеки. Базовим рішенням є застосування бетонів на сульфатостійкому або шлакопортландцементі з високою водонепроникністю та зниженим водоцементним співвідношенням. Інші технологічні рішення доцільно застосовувати вибірково та зважати на вимоги економічної ефективності.

Диференційований підхід забезпечує оптимальний баланс між безпекою, довговічністю, технологічністю та екологічною відповідальністю підземних захисних

споруд у гідрогеологічних умовах Харківської області.

Таблиця 1 - Порівняльна характеристика бетонів для підземних захисних споруд

Тип бетону	В/Ц	Міцність на стиск, МПа	Проникність (клас водонепроникності)	Стійкість до SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Доцільність застосування для умов Харківщини
Звичайний важкий бетон	0,50-0,65	20-40	W4-W8	низька - середня	Обмежена придатність; можливе застосування лише при низькому рівні ґрунтових вод і додатковій гідроізоляції
Бетон із мінеральними добавками (мікрокремнезем, зола, шлак)	0,30-0,45	40-70	W10-W16	висока	Рекомендований для умов змінної вологості та агресивного середовища; підвищена довговічність
Самоущільнювальний бетон	0,30-0,40	50-80	W12-W18	висока	Ефективний для густоармованих конструкцій підземних споруд; забезпечує щільну структуру
Високоміцний бетон	0,25-0,35	60-100	W14-W20	дуже висока	Висока доцільність для відповідальних конструкцій, фундаментів, перекриттів
Надвисокоміцний бетон	0,18-0,25	120-180	W18-W20 і вище	максимальна	Найбільш ефективний для довговічних і критично відповідальних конструкцій, але економічно обмежений
Бетон із сульфатостійким цементом	0,35-0,45	40-60	W10-W16	дуже висока	Особливо доцільний при наявності сульфатів у ґрунтових водах Харківського регіону

### Список літератури

1. ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту». На заміну ДБН В.2.2-5-97 ; чинний від 2025-04-01. Вид. офіц. Київ : М-во розвитку громад, територій та інфраструктури України, 2023. 127 с. URL: [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3530699073772324792?doc\\_type=2](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3530699073772324792?doc_type=2).

2. Paul A., Paul A., Dr. Elson J. Study on the Properties of High-Performance Concrete: A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2022. Vol. 9, no. 6. P. 3238–3243. URL: [https://www.researchgate.net/publication/384092661\\_Study\\_on\\_the\\_Properties\\_of\\_High-Performance\\_Concrete\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/384092661_Study_on_the_Properties_of_High-Performance_Concrete_A_Review)

3. Ultra-High Performance Concrete: A Review / A. Rawat et al. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*. 2020. Vol. 11, no. 5. P. 786–800. URL: [https://www.researchgate.net/publication/359897421\\_Ultra-High\\_Performance\\_Concrete\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/359897421_Ultra-High_Performance_Concrete_A_Review).

4. Lv Z., Zhang M., Sun Y. Research on The Chloride Diffusion Modified Model for Marine Concretes with Nanoparticles under The Action of Multiple Environmental Factors. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, no. 12. P. 18–52. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse10121852>.

5. Shah A., Khan S., Effect of High Range Water Reducers (HRWR) on the Properties and Strength Development Characteristics of Fresh and Hardened Concrete. *Iranian Journal of Science and Technology* -

*Transactions of Civil Engineering*. 2013. Vol. 37. P. 513–517. URL:

[https://www.researchgate.net/publication/281926907\\_EFFECT\\_OF\\_HIGH\\_RANGE\\_WATER\\_REDUCERS\\_HRWR\\_ON\\_THE\\_PROPERTIES\\_AND\\_STRENGTH\\_DEVELOPMENT\\_CHARACTERISTICS\\_OF\\_FRESH\\_AND\\_HARDENED\\_CONCRETE](https://www.researchgate.net/publication/281926907_EFFECT_OF_HIGH_RANGE_WATER_REDUCERS_HRWR_ON_THE_PROPERTIES_AND_STRENGTH_DEVELOPMENT_CHARACTERISTICS_OF_FRESH_AND_HARDENED_CONCRETE)

6. The Effects of Crystalline Admixtures on Concrete Permeability and Compressive Strength: A Review / M. A. Ammar et al. *Buildings*. 2024. Vol. 14, no. 9. P. 1–36. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14093000>.

7. Fiber Reinforced Concrete: A Review / M. Anas et al. *ICEC 2022*. Basel Switzerland, 2022. URL: <https://doi.org/10.3390/engproc2022022003>

8. ДБН В.2.6-98:2009 БЕТОННІ ТА ЗАЛІЗОБЕТОННІ КОНСТРУКЦІЇ Основні положення. На заміну СНиП 2.03.01-84\*. Бетонні та залізобетонні конструкції ; чинний від 2020-06-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2020. 71 с. URL: <https://e-construction.gov.ua/files-token/74ed738f9fcd2d1e4bc772b051e2de1d>.

9. ДБН В.2.2-5-97 Будинки та споруди. Захисні споруди цивільного захисту. Чинний від 1998-01-01. Вид. офіц. Київ : Держкоммістобудування України, 1998. 82 с. URL: <https://mtu.gov.ua/files/ДБН%20В.2.2-5-97.%20%20Будинки%20і%20споруди.1210.pdf>.

10. ДСТУ Б В.2.6-145:2010 Конструкції будинків і споруд. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. Загальні технічні вимоги (ГОСТ 31384-2008, NEQ). На заміну СТ СЭВ 4420-83 «Защита от коррозии в строительстве. Общие конструкции» та СНиП 2.03.11-85 «Защита

строительных конструкций от коррозии» ; чинний від 2011-07-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 56 с. URL: [https://dbn.at.ua/ld/8/811\\_2.6-1452010-.pdf](https://dbn.at.ua/ld/8/811_2.6-1452010-.pdf).

11. Кліматичний кадастр України (1991–2020) / Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. URL: [sco-sreznevskiy.kyiv.ua](http://sco-sreznevskiy.kyiv.ua) (дата звернення: 13.02.2026).

12. Strengthening the role of hydrogeological research in the system of engineering investigations for construction / V. Petik et al. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series Geology. Geography. Ecology*. 2024. No. 60. P. 68–79. URL: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-05>

13. Geological Hazards During Construction and Operation of Shallow Subway Stations and Tunnels by the Example of the Kharkiv Metro (1968–2018) / V. Iegupov et al. *International journal of georesources and environment*. 2018. Vol. 4, no. 4. P. 187–200. URL: <https://doi.org/10.15273/ijge.2018.04.030>.

14. Integral waterproof concrete: A comprehensive review / S. Jahandari et al. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 78. P. 107718. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107718>.

15. Doan T. T. Comprehensive evaluation of the aggressive certain degree of the chemical components in water to concrete. *Frontiers in Built Environment*. 2024. Vol. 10. URL: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1275218>

16. Карта ґрунтів Харківської області. *Карта ґрунтів Харківської області*. URL: <https://geomap.land.kiev.ua/obl-19.html>.

17. Self-healing concrete: Fabrication, advancement, and effectiveness for long-term integrity of concrete infrastructures / M. M. Meraz et al. *Alexandria Engineering Journal*. 2023. Vol. 73. P. 665–694. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.05.008>.

18. Rudnicki T. Design of Self-Compacting Concrete with Reduced Cement Content by Aggregate Packing Method. *Materials*. 2024. Vol. 18, no. 1. P. 4. URL: <https://doi.org/10.3390/ma18010004>.

19. Tanimola J. O., Efe S. Recent advances in nano-modified concrete: Enhancing durability, strength, and sustainability through nano silica (nS) and nano titanium (nT) incorporation. *Applications in Engineering Science*. 2024. Vol. 19. P. 100189. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apples.2024.100189>.

20. Sanchez F., Sobolev K. Nanotechnology in concrete – A review // *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24, No. 11. P. 2060–2071. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>

21. Investigation on the technical properties of sulfate resistant cement, a potential alternative to Portland cement for aggressive environments / H. Merabet et al. *STUDIES IN ENGINEERING AND EXACT SCIENCES*. 2024. Vol. 5, no. 2. P. 1–17. URL: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/sees/article/view/9307/5448>

22. Polymer-enhanced concrete: A comprehensive review of innovations and pathways for resilient and

sustainable materials / B. A. Salami et al. *Next Materials*. 2024. Vol. 4. P. 100225. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2024.100225>

## References (transliterated)

1. Ministry for Communities, Territories and Infrastructure Development of Ukraine. (2023). *DBN V.2.2-5:2023 Zakhysni sporudy tsyvilnoho zakhystu* [DBN V.2.2-5:2023 Civil defense structures]. [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3530699073772324792?doc\\_type=2](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3530699073772324792?doc_type=2)

2. Paul A., Paul A., Dr. Elson J. Study on the Properties of High-Performance Concrete: A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2022. Vol. 9, no. 6. P. 3238–3243. URL:

[https://www.researchgate.net/publication/384092661\\_Study\\_on\\_the\\_Properties\\_of\\_High-Performance\\_Concrete\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/384092661_Study_on_the_Properties_of_High-Performance_Concrete_A_Review)

3. Ultra-High Performance Concrete: A Review / A. Rawat et al. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*. 2020. Vol. 11, no. 5. P. 786–800. URL: [https://www.researchgate.net/publication/359897421\\_Ultra-High\\_Performance\\_Concrete\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/359897421_Ultra-High_Performance_Concrete_A_Review)

4. Lv Z., Zhang M., Sun Y. Research on The Chloride Diffusion Modified Model for Marine Concretes with Nanoparticles under The Action of Multiple Environmental Factors. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, no. 12. P. 18–52. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse10121852>.

5. Shah A., Khan S., Effect of High Range Water Reducers (HRWR) on the Properties and Strength Development Characteristics of Fresh and Hardened Concrete. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*. 2013. Vol. 37. P. 513–517. URL:

[https://www.researchgate.net/publication/281926907\\_EFFECT\\_OF\\_HIGH\\_RANGE\\_WATER\\_REDUCERS\\_HRWR\\_ON\\_THE\\_PROPERTIES\\_AND\\_STRENGTH\\_DEVELOPMENT\\_CHARACTERISTICS\\_OF\\_FRESH\\_AND\\_HARDENED\\_CONCRETE](https://www.researchgate.net/publication/281926907_EFFECT_OF_HIGH_RANGE_WATER_REDUCERS_HRWR_ON_THE_PROPERTIES_AND_STRENGTH_DEVELOPMENT_CHARACTERISTICS_OF_FRESH_AND_HARDENED_CONCRETE)

6. The Effects of Crystalline Admixtures on Concrete Permeability and Compressive Strength: A Review / M. A. Ammar et al. *Buildings*. 2024. Vol. 14, no. 9. P. 1–36. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14093000>.

7. Fiber Reinforced Concrete: A Review / M. Anas et al. *ICEC 2022*. Basel Switzerland, 2022. URL: <https://doi.org/10.3390/engproc2022022003>

8. Ministry of Regions of Ukraine. (2020). *DBN V.2.6-98:2009 Betonni ta zalizobetonna konstruktshii. Osnovni polozhennia* [DBN V.2.6-98:2009 Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions]. <https://e-construction.gov.ua/files-token/74ed738f9fcd2d1e4bc772b051e2de1d>

9. State Committee for Urban Planning of Ukraine. (1998). *DBN V.2.2-5-97 Budyanky ta sporudy. Zakhysni*

*sporudy tsyvilnoho zakhystu* [DBN V.2.2-5-97 Buildings and structures. Civil defense structures]. <https://mtu.gov.ua/files/ДБН%20В.2.2-5-97.%20%20Будинки%20%20споруди.1210.pdf>

10. Ministry of Regional Construction. (2010). *DSTU B V.2.6-145:2010 Konstruktsii budynkiv i sporud. Zakhyst betonnykh i zalizobetonnykh konstruktsii vid korozii* [DSTU B V.2.6-145:2010 Structures of buildings and structures. Protection of concrete and reinforced concrete structures from corrosion]. [https://dbn.at.ua/ld/8/811\\_2.6-1452010-.pdf](https://dbn.at.ua/ld/8/811_2.6-1452010-.pdf)

11. Klimatychnyi kadastr Ukrainy (1991–2020) / Tsentralna heofizychna observatoriia imeni Borysa Sreznhevskoho. URL: [cgo-sreznhevskiy.kyiv.ua](http://cgo-sreznhevskiy.kyiv.ua) (data zvernennia: 13.02.2026).

12. Strengthening the role of hydrogeological research in the system of engineering investigations for construction / V. Petik et al. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series Geology. Geography. Ecology*. 2024. No. 60. P. 68–79. URL: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-05>

13. Geological Hazards During Construction and Operation of Shallow Subway Stations and Tunnels by the Example of the Kharkiv Metro (1968–2018) / V. Iegupov et al. *International journal of georesources and environment*. 2018. Vol. 4, no. 4. P. 187–200. URL: <https://doi.org/10.15273/ijge.2018.04.030>.

14. Integral waterproof concrete: A comprehensive review / S. Jahandari et al. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 78. P. 107718. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107718>.

15. Doan T. T. Comprehensive evaluation of the aggressive certain degree of the chemical components in water to concrete. *Frontiers in Built Environment*. 2024. Vol. 10. URL: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1275218>

16. Karta gruntiv Kharkivskoi oblasti. Karta gruntiv Kharkivskoi oblasti. URL: <https://geomap.land.kiev.ua/obl-19.html>.

17. Self-healing concrete: Fabrication, advancement, and effectiveness for long-term integrity of concrete infrastructures / M. M. Meraz et al. *Alexandria Engineering Journal*. 2023. Vol. 73. P. 665–694. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.05.008>.

18. Rudnicki T. Design of Self-Compacting Concrete with Reduced Cement Content by Aggregate Packing Method. *Materials*. 2024. Vol. 18, no. 1. P. 4. URL: <https://doi.org/10.3390/ma18010004>.

19. Tanimola J. O., Efe S. Recent advances in nano-modified concrete: Enhancing durability, strength, and sustainability through nano silica (nS) and nano titanium (nT) incorporation. *Applications in Engineering Science*. 2024. Vol. 19. P. 100189. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apples.2024.100189>.

20. Sanchez F., Sobolev K. Nanotechnology in concrete – A review // *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24, No. 11. P. 2060–2071. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>

21. Investigation on the technical properties of sulfate resistant cement, a potential alternative to Portland cement for aggressive environments / H. Merabet et al. *STUDIES IN ENGINEERING AND EXACT SCIENCES*. 2024. Vol. 5, no. 2. P. 1–17. URL: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/sees/article/view/9307/5448>

22. Polymer-enhanced concrete: A comprehensive review of innovations and pathways for resilient and sustainable materials / B. A. Salami et al. *Next Materials*. 2024. Vol. 4. P. 100225. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2024.100225>

#### **Відомості про авторів / About the Authors**

**Галайко Богдан Юрійович (Halaiko Bohdan)** – аспірант кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0854-952X>; e-mail: [bohdan.halaiko@kname.edu](mailto:bohdan.halaiko@kname.edu).

**Христич Олена Валеріївна (Khrystych Olena)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків; м. Харків, Україна; Тел.: +38(095)577-24-50; ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-2190-1492> ; e-mail: [el-green@ukr.net](mailto:el-green@ukr.net)

Дата надходження статті: 18.02.26 р.

Дата прийняття до друку: 20.03.26 р.