

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ»

БАРДАХ ОЛЕКСАНДР ЮХИМОВИЧ



УДК 691.3:620.193

**ДОВГОВІЧНІСТЬ БЕТОНУ В УМОВАХ ДІЇ
СУЛЬФАТНИХ РОЗЧИНІВ І ТЕМПЕРАТУРИ**

05.23.05 – будівельні матеріали та вироби

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному вищому навчальному закладі «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» (ДВНЗ ПДАБА) Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Савицький Микола Васильович,
Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», ректор,
професор кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Шейніч Леонід Олександрович**, Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», завідувач відділу технології виготовлення залізобетонних конструкцій;

доктор технічних наук, професор **Нетеса Микола Іванович**, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, професор кафедри будівельного виробництва та геодезії.

Захист відбудеться 28 квітня 2021 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.085.01 при Державному вищому навчальному закладі «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» за адресою: 49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24а, ауд. 202.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» (49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24а) та на сайті <https://pgasa.dp.ua/dissertation/>.

Автореферат розісланий «__» березня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



С. В. Шатов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Бетон і залізобетон є одними з найпоширеніших будівельних матеріалів, які використовуються для спорудження будівель і споруд різноманітного призначення. Значна кількість залізобетонних конструкцій експлуатується в агресивних умовах, серед яких вагоме місце займають рідкі середовища з розчинами солей (хлориди, сульфати, карбонати та ін.). Агресивним впливом на бетон і залізобетон характеризуються морські, річкові, озерні та ґрунтові води. В Україні наявні всі перелічені типи рідких агресивних середовищ. Води Чорного та Азовського морів, річки, що впадають у них, а також ґрунтові води степових територій характеризуються присутністю сульфат-, хлор- та магній-іонів. Тому застосування залізобетонних конструкцій потребує заходів із забезпечення необхідної довговічності з урахуванням впливу агресивного середовища.

Згідно з діючими нормами, довговічність конструкцій рекомендується забезпечувати вживанням корозійностійких матеріалів, добавок, що підвищують корозійну стійкість бетону, зниженням проникності бетону, встановленням вимог за тріщиностійкістю, товщиною захисного шару бетону.

Залізобетонні конструкції, які запроектовано і виготовлено відповідно до вимог чинних нормативних документів, повинні мати достатню стійкість до дій, що спричиняють корозію бетону. Проте такі норми носять рекомендаційний характер і не містять кількісних характеристик для оцінювання процесу корозії.

Існуючі дослідження підтверджують, що проектування залізобетонних конструкцій з урахуванням зміни характеристик бетону під впливом корозійних процесів дозволяє підвищити ефективність антикорозійного захисту. На сьогодні вже розроблено ряд математичних моделей для опису кінетики сульфатної корозії бетону. З використанням цих моделей запропоновано методики прогнозування довговічності залізобетонних конструкцій в рідких середовищах.

Сульфатна корозія є складним процесом та залежить від багатьох факторів, які пов'язані з мінералогічними характеристиками цементу, складом бетону, наявністю активних домішок, концентрацією агресивної речовини та температурою середовища. Тим не менше, як норми з захисту залізобетонних конструкцій від корозії, так і наявні дослідження не враховують вплив температури експлуатаційного середовища на інтенсивність протікання корозійних процесів.

Виходячи з аналізу існуючих даних і моделей визначення довговічності бетону і залізобетону під впливом агресивних сульфатних розчинів, розроблення математичної моделі для опису процесу розвитку сульфатної корозії з урахуванням температури середовища і його впливу на довговічність конструкції є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові дослідження, викладені в дисертації, виконані згідно з напрямом наукової діяльності кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій ДВНЗ ПДАБА, відповідно до науково-дослідних робіт: «Створення методології раціонального

проектування ресурсозберігаючих архітектурно-конструктивно-технологічних систем для будівництва доступного житла» (№ держреєстрації (ДР) 0111U000455, 2011-2012 рр.), «Розробка наукових засад створення високотехнологічних соціоекокомплексів в Україні на основі концепції стійкого розвитку» (№ ДР 0113U00129, 2013-2014 рр.), «Розробка наукових засад трансформації будівель та житлових комплексів сучасних великих міст України на основі інноваційних екотехнологій» (№ ДР 0115U000218, 2015–2016 рр.), «Розробка наукових основ інноваційної архітектурно-конструктивно-технологічної системи будівництва методом 3D-друку» (№ ДР 0119U100608, 2019-2020 рр.), у яких здобувач брав участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток наукових положень прогнозування довговічності бетону та залізобетону в умовах дії сульфатних розчинів з урахуванням температури середовища.

Для досягнення мети поставлені та вирішені такі завдання дослідження:

- аналіз існуючих математичних моделей сульфатної корозії бетону та методів прогнозування довговічності бетону в умовах сульфатної корозії;
- удосконалення математичної моделі сульфатної корозії бетону шляхом врахування температури середовища;
- розроблення методу прогнозування довговічності бетону захисного шару при сульфатній корозії з урахуванням температури середовища;
- експериментально-теоретичні дослідження впливу карбонатних заповнювачів на сульфатостійкість бетону;
- дослідження техніко-економічних показників антикорозійного захисту залізобетонних конструкцій в умовах сульфатної корозії з урахуванням температури середовища.

Об'єкт дослідження – корозійні процеси в бетоні залізобетонних конструкцій в умовах дії сульфатних розчинів з урахуванням температури середовища.

Предмет дослідження – довговічність бетону залізобетонних конструкцій в умовах дії сульфатних розчинів з урахуванням температури середовища.

Методи дослідження: аналізу та синтезу, математичного моделювання, методи експериментальних досліджень, методи техніко-економічної оцінки.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблено математичну модель сульфатної корозії бетону з урахуванням температури середовища (*отримано вперше*);
- запропоновано аналітичну модель розподілу температури ґрунту по глибині та отримано дані щодо довговічності бетону захисного шару в умовах сульфатної корозії в ґрунті (*отримано вперше*);
- одержано експериментальні дані про довговічність бетону в умовах сульфатної корозії та вплив карбонатних заповнювачів на сульфатостійкість бетону (*отримало подальший розвиток*);
- отримані дані щодо залежності кінетики сульфатної корозії бетону від характеристик зовнішнього середовища (концентрації, температури та

тривалості впливу) та параметрів бетону (хіміко-мінералогічний склад, вид заповнювача) (*отримало подальший розвиток*).

Практичне значення отриманих результатів. На основі проведених досліджень запропоновано методику прогнозування довговічності бетону захисного шару в умовах сульфатної корозії в ґрунті з урахуванням температури середовища.

Результати досліджень можуть використовуватися в проектних організаціях, при проектуванні і призначенні параметрів бетону захисного шару залізобетонних конструкцій, що експлуатуються в рідких агресивних середовищах.

Результати досліджень використані в навчальному процесі ДВНЗ ПДАБА при підготовці здобувачів вищої освіти за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» за освітньою програмою «Промислове та цивільне будівництво» при викладанні спеціального курсу «Раціональне проектування залізобетонних конструкцій».

Особистий внесок здобувача в наукових працях, опублікованих в співавторстві: сформульовано математичні залежності, що описують кінетику сульфатної корозії, та основні положення оцінювання міцності бетону при сульфатній корозії [1, 2, 6, 7, 8]; виконано оцінювання впливу конструктивно-технологічних параметрів бетону на його довговічність [3]; виконано аналіз експериментальних даних про довговічність бетону в умовах сульфатної корозії та вплив складу суміші на сульфатостійкість бетону [5, 11, 12]; сформульовано вимоги до конструкцій, що експлуатуються в рідких агресивних середовищах [4, 13, 14]; розроблено конструктивні рішення залізобетонних конструкцій з урахуванням вимог щодо довговічності [8, 9, 10, 15, 16].

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на міжнародних і вітчизняних науково-технічних конференціях і семінарах: Міжнародній науково-практичній конференції «Створення високотехнологічних соціоекокомплексів в Україні на основі концепції збалансованого (стійкого) розвитку» (м. Алушта, 2013 р.); 14-тій Міжнародній конференції «enviBUILD 2019» (м. Братислава, Словаччина, 2019 р.).

Публікації. Основні положення, результати та висновки дисертаційної роботи відображені в 16 наукових працях, у тому числі 6 статтях у наукових фахових виданнях України, 1 статті у закордонному фаховому виданні, яке включено до наукометричної бази Web of Science, 1 публікації, яка засвідчує апробацію матеріалів дисертації, та 8 публікаціях, які додатково відображають наукові результати дисертації (6 статтях у наукових фахових виданнях України, 2 колективних монографіях).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел зі 118 найменувань, двох додатків. Повний обсяг дисертації становить 164 сторінки, обсяг основного тексту – 4,625 авторських аркуша. Список використаних джерел викладено на 14 сторінках. Додатки представлено на 7 сторінках. Робота містить 44 рисунки та 48 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету, завдання та методи досліджень, наукову новизну і практичне значення роботи; вказано особистий внесок здобувача, а також відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** розглянуто основні принципи та вимоги до проектування залізобетонних конструкцій за критерієм довговічності, приведено аналіз робіт вітчизняних та зарубіжних учених, які присвячені питанням дослідження механізмів, аналітичному опису та математичному моделюванню процесу сульфатної корозії бетону, а також методів прогнозування довговічності бетону в умовах сульфатної корозії та корозії арматури.

Ґрунтовні дослідження, присвячені розкриттю механізму корозії бетону в сульфатних середовищах та розробленню ефективних складів бетонів при дії агресивних впливів, виконані такими вченими, як І. Є. Ахвердов, В. І. Бабушкін, Г. К. Демент'єв, Є. А. Гузеєв, Ф. М. Іванов, В. Е. Москвін, А. Ф. Полак, Н. К. Розенталь, Т. В. Рубецька, Р. Ф. Рунова, В. В. Троян, М. Ф. Тихомирова, С. В. Шестоперов, С. В. Федосов, С. М. Базанов, М. В. Савицький, Л. О. Шейніч, М. І. Нетеса та іншими.

На сьогоднішній день розроблена велика кількість математичних моделей сульфатної корозії бетону, проте існуючі залежності не враховують вплив температури експлуатаційного середовища на кінетику корозійного процесу, а також вплив корозії арматури на довговічність бетону. Великий обсяг залізобетонних конструкцій експлуатується в ґрунтах, що характеризуються агресивним впливом сульфатів та зміною температурного режиму (конструкції фундаментів, підпірні стіни тощо). Необхідне розроблення аналітичних залежностей для врахування впливу цих особливостей на інтенсивність корозійних процесів. Ефективним для забезпечення сульфатостійкості бетону є застосування активних компонентів бетонної суміші, серед яких заповнювачі на основі карбонатних порід. Для обґрунтування їх застосування необхідне проведення експериментальних досліджень довговічності бетону в сульфатних розчинах, а також оцінювання техніко-економічних показників залізобетонних конструкцій в залежності від характеристик зовнішнього середовища (концентрації, температури та тривалості впливу) та параметрів бетону (хіміко-мінералогічний склад, вид заповнювача).

Другий розділ присвячено розробленню математичної моделі сульфатної корозії бетону з урахуванням температури експлуатаційного середовища.

Удосконалено математичну модель сульфатної корозії бетону шляхом введення ефективного коефіцієнту дифузії, що залежить від температури. Кінетику сульфатної корозії при змінній температурі експлуатаційного середовища можна описати такою системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial c_0(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_0(T) \frac{\partial c_0(x,t)}{\partial x} \right) - kc_0(x,t)c_1(x,t) \\ \frac{\partial c_1(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_1(T) \frac{\partial c_1(x,t)}{\partial x} \right) - \chi kc_0(x,t)c_1(x,t) \\ \frac{\partial c_2(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_2(T) \frac{\partial c_2(x,t)}{\partial x} \right) + kc_0(x,t)c_1(x,t) - k_1c_2(x,t)c_3(x,t), \\ \frac{\partial c_3(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_3(T) \frac{\partial c_3(x,t)}{\partial x} \right) - \varphi k_1c_2(x,t)c_3(x,t) \\ \frac{\partial c_4(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_4(T) \frac{\partial c_4(x,t)}{\partial x} \right) + k_1c_2(x,t)c_3(x,t) \end{array} \right. \quad (1)$$

де $c_0(x,t)$, $c_1(x,t)$, $c_2(x,t)$, $c_3(x,t)$, $c_4(x,t)$ – концентрації сульфат-іонів, іонів кальцію, гіпсу, гідроалюмінати кальцію, еттрінгіта відповідно;

$D_0(T)$, $D_1(T)$, $D_2(T)$, $D_3(T)$, $D_4(T)$ – ефективні коефіцієнти дифузії, відповідно, сульфат-іонів, іонів кальцію, гіпсу, гідроалюмінату кальцію, еттрінгіта, що залежать від температури експлуатаційного середовища;

χ , φ – стехіометричні коефіцієнти, які відображають відносну кількість речовин, що беруть участь в реакції;

k , k_1 – константи швидкості хімічних реакцій;

t – час;

x – координата по глибині бетону від поверхні.

Ефективний коефіцієнт дифузії іонів речовин у бетоні з урахуванням температури середовища можна представити таким чином:

$$D_{b,i}(T) = a\omega_{b0}D_i(T), \quad (2)$$

де $D_{b,i}(T)$ – ефективний коефіцієнт дифузії іонів в бетоні з урахуванням температури середовища;

$D_i(T)$ – коефіцієнт дифузії i -іонів у водному розчині з урахуванням температури середовища;

ω_{b0} – обсяг відкритих пор;

a – коефіцієнт, що дорівнює $a = 0,026 \times 10^{-2}$.

Залежність коефіцієнта дифузії від температури близька до закону Арреніуса, тому може бути записана у вигляді:

$$D_i(T) = D_{i,ref} \cdot f(T), \quad (3)$$

де $f(T)$ – функція впливу температури на коефіцієнт дифузії:

$$f(T) = \exp \left[\frac{E_D}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (4)$$

T – еталонна температура, яка приймається 25°C ;

$D_{i,ref}$ – коефіцієнт дифузії при еталонній температурі;

E_D – енергія активації процесу дифузії, кДж/моль;

R – універсальна газова стала, що дорівнює $8,314$ Дж/(моль·К).

Слід відзначити, що запропоновані залежності справедливі для температур більше 0 °С. Графіки зміни коефіцієнта дифузії (для сульфат-іонів) у бетоні в залежності від водоцементного співвідношення та температури приведені на рис. 1.

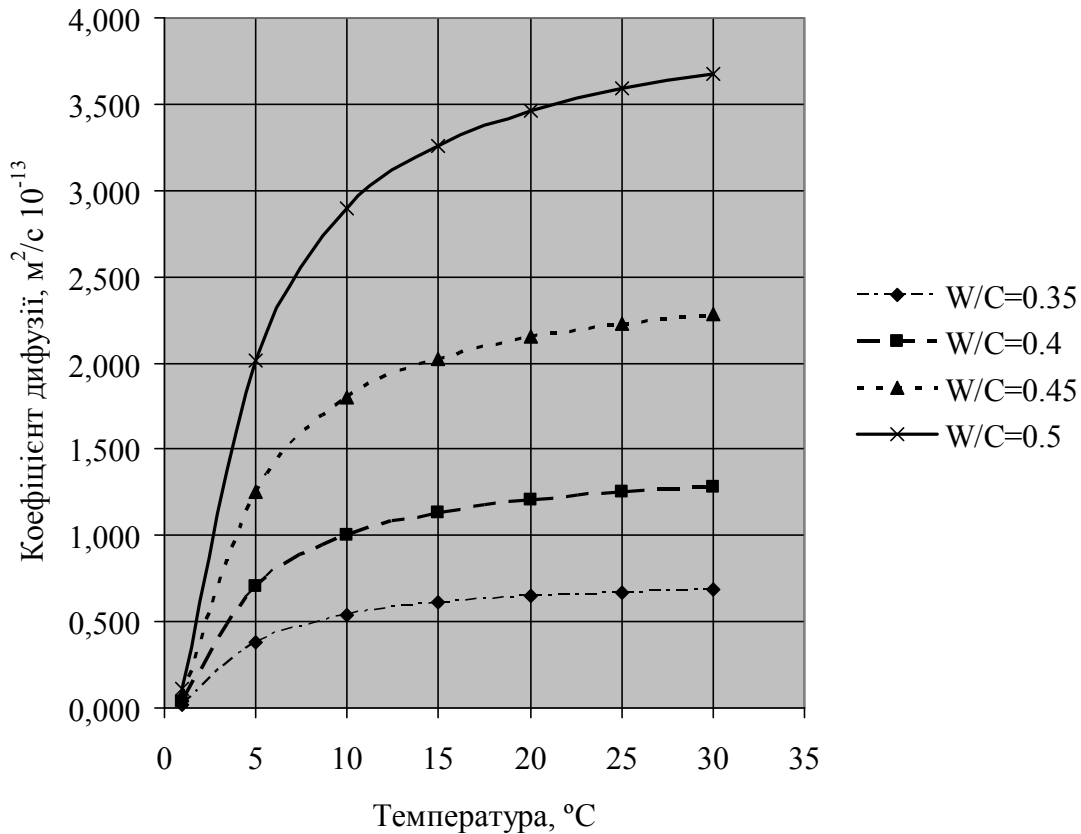


Рисунок 1 – Графік залежності коефіцієнта дифузії сульфат-іонів в бетоні від температури середовища

Отримана модель дозволяє врахувати всі основні особливості процесів корозії бетону при впливі сульфатів і з задовільною точністю описати закономірність розподілу пов'язаних сульфат-іонів і відносної міцності бетону. Таким чином, знаючи параметри середовища експлуатації (концентрацію сульфат-іонів як агресивної речовини та температуру як каталізатор корозійного процесу), можна виконувати підбір параметрів первинного захисту, а саме: склад бетону, водо-цементне співвідношення, товщину захисного шару тощо.

Виконано оцінювання впливу міцності бетону і товщини захисного шару на довговічність залізобетону з урахуванням корозії арматури. На рис. 2 представлено поперечний переріз бетонного елемента з арматурним стержнем, що кородує в ньому. Будемо вважати тиск продуктів корозії рівномірно розподіленим по поверхні контакту бетону та арматури. Розподіл напружень в плоскому полі, обмеженому прямою, з розташованим на деякій відстані від прямолінійного краю круговим отвором радіусом R , по контуру якого прикладено рівномірно розподілений тиск P , може бути визначено на основі передумов теорії пружності.

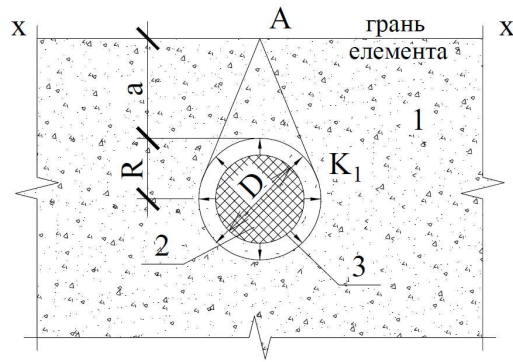


Рисунок 2 – Розрахункова схема перерізу залізобетонного елемента з одиночним сталевим стержнем, що кородує: 1 – бетонний елемент; 2 – сталевий арматурний стержень; 3 – продукти корозії.

Якщо x позначено відстань, що відкладена від точки A вздовж осі A_x , то напруження σ_x по контуру прямолінійної грані на півплощини (осі A_x) буде дорівнювати:

$$\sigma_x = -4P \frac{x^2 - 2aR - a^2}{x^2 + 2aR + a^2}, \quad (5)$$

де a – найкоротша відстань до контуру отвору від межі напівплощини;
 P – тиск продуктів корозії арматури.

Графік функції $\sigma_x / P = f(x)$ при $x > 0$ і при різних значеннях a/R представлено на рис. 3. Графік функцій $\sigma_x / P = \psi(a/R)$ та $\sigma_R / P = f(a/R)$ приведено на рис. 4.

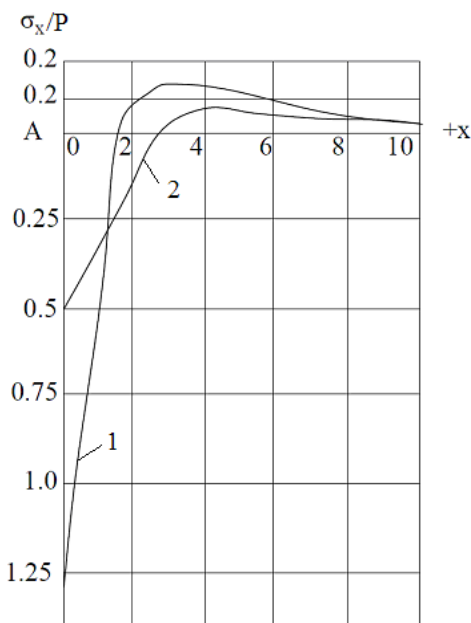


Рисунок 3 – Напруження на грані залізобетонного елемента поблизу арматурного стержня, що кородує, при різних значеннях параметра a/R : 1 – $a/R = 2$; 2 – $a/R = 1$.

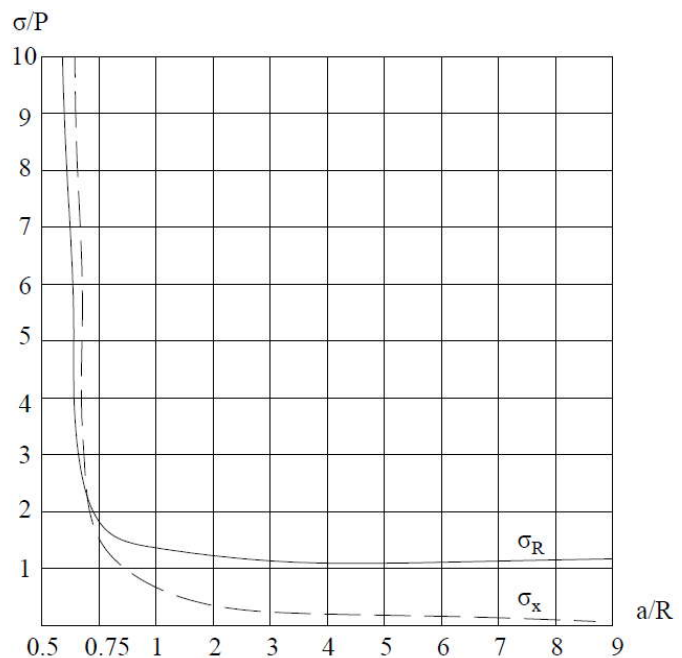


Рисунок 4 – Графік максимальних розтягуючих напружень у бетоні поблизу арматурного стержня, що кородує: σ_R – в точці K_1 на контурі кругового отвору по контуру контакту бетону та арматури; σ_x – в точці A на межі напівплощини.

Довговічність залізобетонної конструкції істотно нелінійно залежить від міцності і товщини захисного шару бетону. У деякому інтервалі величин захисних шарів порівняно невелика зміна товщини захисного шару призводить до різкої зміни довговічності конструкції. Призначення раціональної величини захисного шару бетону, заходи щодо забезпечення проектної величини захисного шару при виготовленні залізобетону і підвищення міцності при розтягуванні бетону в захисному шарі, поряд із щільністю бетону, мають вирішальне значення для підвищення довговічності залізобетонних конструкцій.

В **третьому розділі** приводиться аналітична модель розподілу температури ґрунту по глибині для врахування температури експлуатаційного середовища при прогнозуванні довговічності бетону конструкцій, що експлуатуються в ґрунтах.

Проаналізовані та систематизовані основні фактори формування температурного режиму ґрунтів, які включають процеси надходження, переносу, акумуляції і віддачі тепла. Сформульовано рівняння теплового балансу ґрунту, що включає довгохвильове випромінювання, короткохвильове випромінювання (сонячна радіація, що поглинається поверхнею), теплопровідність ґрунту (здатність ґрунту проводити теплоту від нагрітих шарів до холодних), конвективний теплообмін та ефект випаровування. Рівняння теплового балансу поверхні має такий вигляд:

$$K_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = R_{nl} - R_{ns} - H_{conv} - H_{ev}, \quad (6)$$

де K_s – теплопровідність ґрунту, Вт/м·К;

T_s – температура ґрунту, °С;

y – глибина, на якій визначається температура, м;

R_{ns} – короткохвильове випромінювання (сонячна радіація), що поглинається поверхнею, Вт/м²;

R_{nl} – чисте довгохвильове сонячне випромінювання, відбите земною поверхнею, Вт/м²;

H_{conv} – тепловтрати внаслідок явища конвекції;

H_{ev} – тепловтрати внаслідок випаровування.

На прикладі м. Дніпро виконано моделювання розподілу температури в ґрунті. Отримані теоретичні дані моделювання розподілу температури по глибині піщаного ґрунту протягом року приведені на графіках (рис. 5).

Прогнозування довговічності бетону захисного шару в умовах сульфатної корозії в ґрунті з урахуванням температури середовища виконано на прикладі залізобетонної палі квадратного поперечного перерізу. З урахуванням розподілу температури по глибині ґрунту були отримані ізополя ушкодження захисного шару бетону в умовах сульфатної корозії при концентрації сульфатів 15, 30 та 50 г/л (рис. 6).

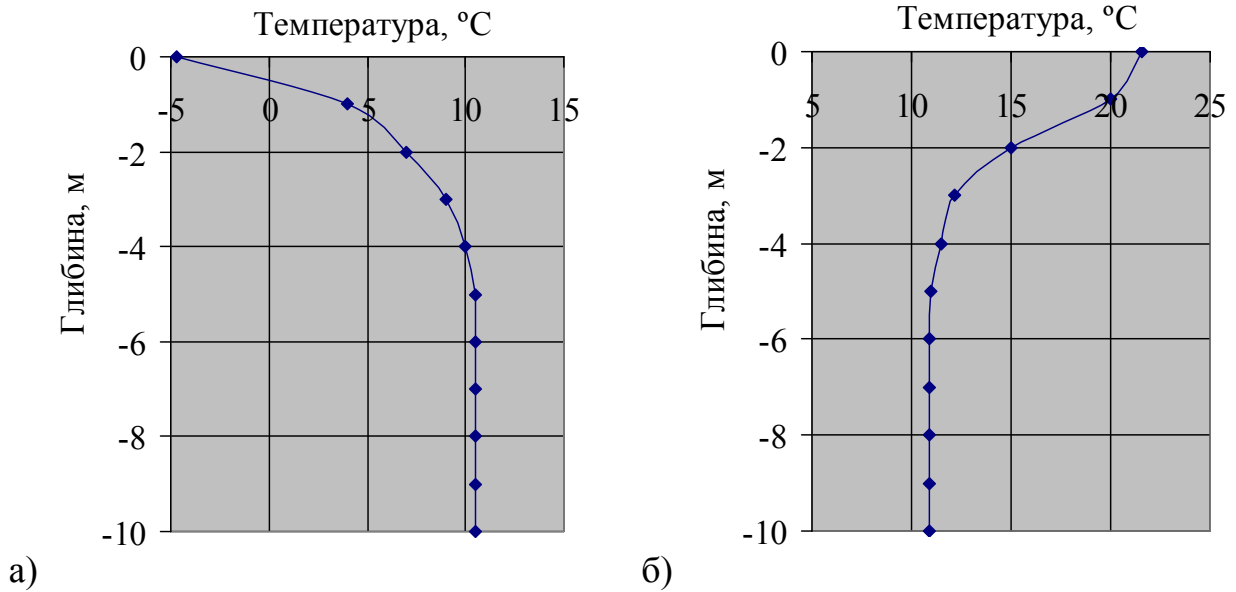


Рисунок 5 – Розподіл температури по глибині піщаного ґрунту для місяців:
а – січня; б – липня.

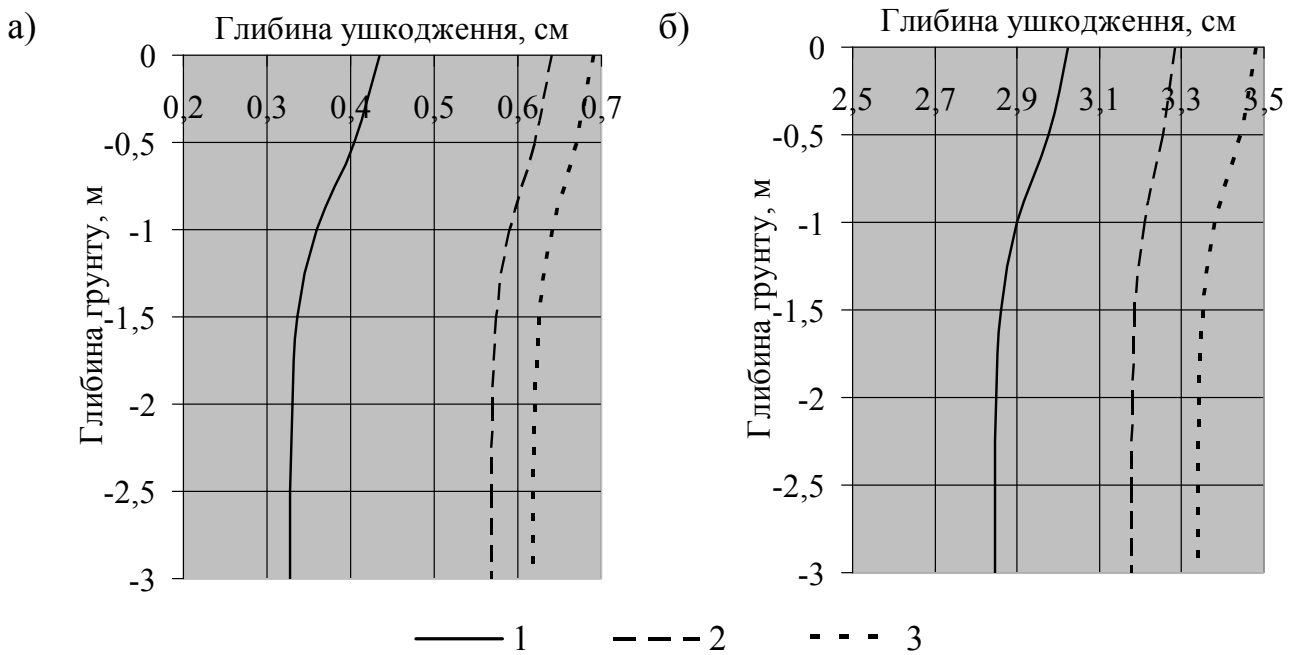


Рисунок 6 – Ізополя ушкодження захисного шару бетону через 10 (а) та 50 (б) років при концентрації SO_4^{2-} : 1 – 15 г/л, 2 – 30 г/л, 3 – 50 г/л.

Виконано оцінювання зміни несучої здатності залізобетонної палі в умовах сульфатної корозії через 10, 50 та 100 років експлуатації при концентрації сульфат-іонів (SO_4^{2-}) 15, 30 та 50 г/л. Теоретична несуча здатність залізобетонної палі з урахуванням впливу сульфатної корозії при концентрації $SO_4^{2-}=15$ г/л через 10 років експлуатації зменшується на 3,9 %, через 50 років – на 24 %, через 100 років - на 29 %; при концентрації $SO_4^{2-}=30$ г/л через 10 років експлуатації зменшується на 6,3 %, через 50 років – на 26 %, через 100 років -

на 31,8 %; при концентрації $SO_4^{2-}=50$ г/л через 10 років експлуатації зменшується на 6,9 %, через 50 років – на 28,7 %, через 100 років - на 33,3 %.

В четвертому розділі приведено методику та результати довготривалих експериментальних досліджень корозійної стійкості бетону в рідкому сульфатному середовищі, спрямовані на підтвердження позитивного впливу карбонатних заповнювачів на сульфатостійкість бетону. Експериментальні дослідження проводилися в лабораторії ДВНЗ ПДАБА, починаючи з 1990 р. Експеримент було розпочато Ф. А. Ракутумаву, наступні проміжні дані через 20 років отримано С. Є. Шехоркіною.

Для дослідження впливу карбонатних наповнювачів на довговічність бетону в агресивних сульфатних розчинах в бетонних сумішах варіювався вміст карбонатного піску і пилоподібних частинок. Окремо було виготовлено серію зразків для порівняльного аналізу, які витримувались у воді. Загалом для виконання досліджень було виконано 8 типів серій зразків. Склад та характеристики бетонних сумішей представлені в табл. 1.

Зразки серії «Д» витримувались у розчині сульфату натрію з концентрацією 5 %. Протягом усього періоду випробувань проводився систематичний моніторинг концентрацій сульфатних розчинів для підтримання концентрації сульфат-іонів у межах допустимого відхилення, яке було прийнято не більше 5 %. У випадку перевищення відхилення концентрації виконувалась повна заміна розчину. Зразки серії «М» витримувались у воді та, на відміну від зразків, що витримувались у сульфатному розчині, були виготовлені у формі кубів із розміром сторони 30 мм.

Таблиця 1 – Склад і характеристики бетонних сумішей для виготовлення зразків

№ серії	Найменування серії	Вміст піску, %			Співвідношення Ц:П:В/Ц
		КВ	КА	ПЧ	
1	Д-50-КВ-88-ПЧ-12	88	-	12	1:2:0.50
2	Д-50-КВ-93-ПЧ-07	93	-	7	1:2:0.50
3	Д-50-КВ-98-ПЧ-02	98	-	2	1:2:0.50
4	Д-50-КВ-100-ПЧ-0	100	-	-	1:2:0.50
5	Д-50-КА-93-ПЧ-07	-	93	7	1:2:0.50
6	Д-50-КА-88-ПЧ-12	-	88	12	1:2:0.50
7	М-55-КА-100-КВ-0	-	100	-	1:2:0.55
8	М-50-КА-100-КВ-0	-	100	-	1:2:0.50

Примітка. КА – карбонатний пісок, КВ – кварцовий пісок, ПЧ - пилоподібні частинки.

В продовження довготривалого експерименту через 30 років експонування в сульфатному розчині Na_2SO_4 з концентрацією 5 % та воді було виконано візуальне обстеження та випробування на стиск. Загальний вигляд зразків після 30 років дослідження довговічності в сульфатному розчині приведено на рис. 7. Результати випробувань зразків на стиск приведені на рис. 8.

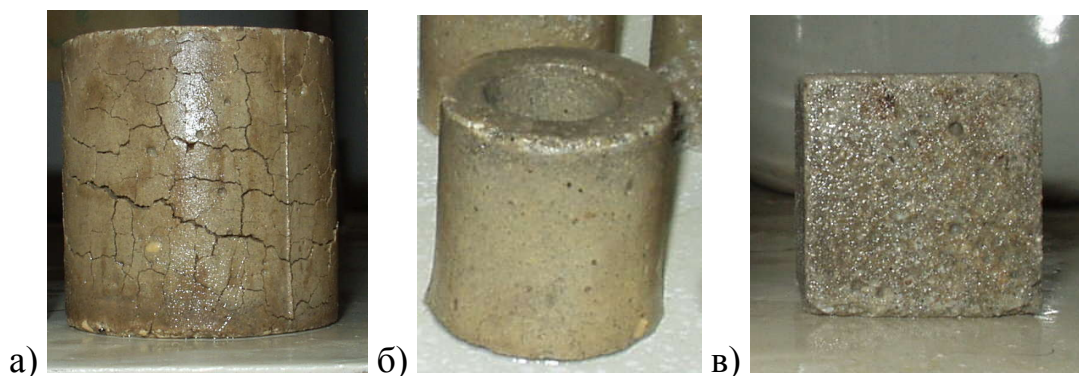


Рисунок 7 - Загальний вигляд зразків після 30 років експозиції в 5 % розчині Na_2SO_4 серії: а) Д-50-КВ-88-ПЧ-12; б) Д-50-КА-88-ПЧ-12; в) серії М-50-КА-100-КВ-0 після 30 років експозиції в воді.

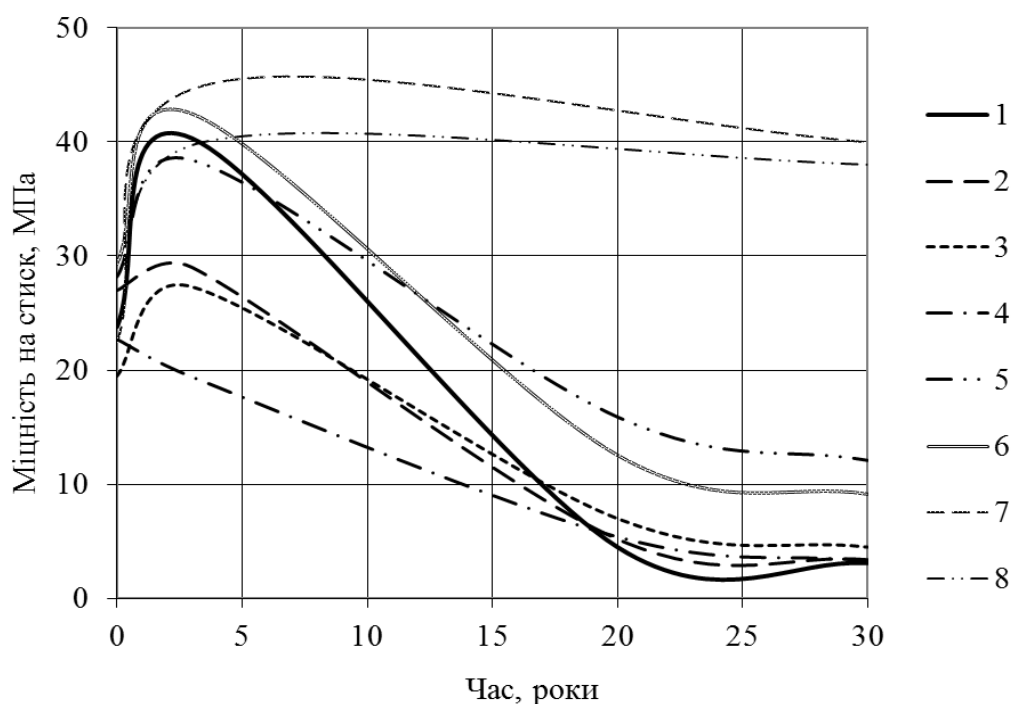


Рисунок 8 – Графіки зміни міцності бетону при експозиції в 5 % розчині Na_2SO_4 та у воді протягом 30 років для серій: 1 - Д-50-КВ-88-ПЧ-12, 2 - Д-50-КВ-93-ПЧ-07, 3 - Д-50-КВ-98-ПЧ-02, 4 - Д-50-КВ-100-ПЧ-0, 5 - Д-50-КА-93-ПЧ-07, 6 - Д-50-КА-88-ПЧ-12, 7 - М-50-КА-100-КВ-0; 8 - М-55-КА-100-КВ-0.

Як видно з рис. 7, зразки на карбонатних заповнювачах майже нешкоджені та характеризуються наявністю незначних волосяних тріщин на поверхні. З іншого боку, зразки, виготовлені з використанням кварцового піску, мають глибокі проникаючі тріщини шириною, що перевищує 1,5...2 мм. Такі результати свідчать про формування кількості новоутворень, що зумовила виникнення внутрішніх напружень, які перевищили міцність бетону на розтяг. Деякі зі зразків зі 100 % вмістом кварцового піску мають наскрізні тріщини на всю висоту зразка і фактично зруйновані. Зразки, що витримувались у воді, не мають істотних ушкоджень.

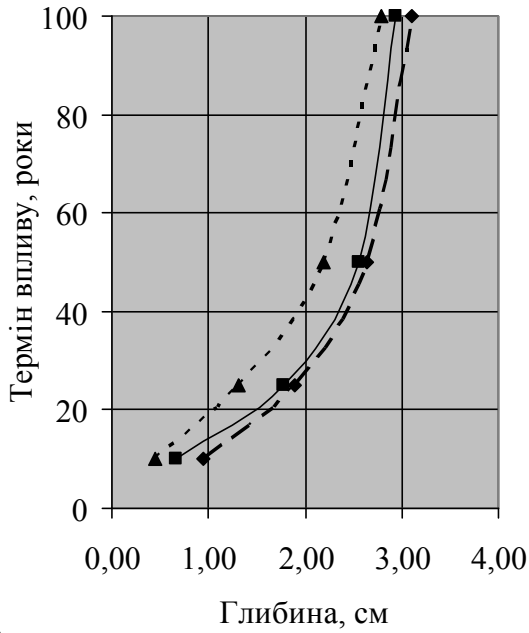
Також було виконано заміри фактичних розмірів зразків для оцінювання зміни об'єму в результаті накопичення продуктів корозії. Початковий об'єм зразків складав 62,8 см³. Найбільше збільшення об'єму спостерігається у зразках серій Д-50-КВ-88-ПЧ-12 зі вмістом кварцового піску 88 %, яке становить 17,64...17,83 %, Д-50-КВ-93-ПЧ-07 зі вмістом кварцового піску 93 % – 16,33...17,34 %, а також Д-50-КВ-100-ПЧ-0 зі 100 % вмістом кварцового піску – 15,83...18,09 %.

Зразки на карбонатному піску характеризуються значно меншим та приблизно однаковим збільшенням об'єму. Зокрема в серії Д-50-КА-93-ПЧ-07 зі вмістом карбонатного піску 93 % збільшення становило 6,41...9,11 % та в серії Д-50-КА-88-ПЧ-12 зі вмістом карбонатного піску 88 % збільшення становило 7,63...9,17 %.

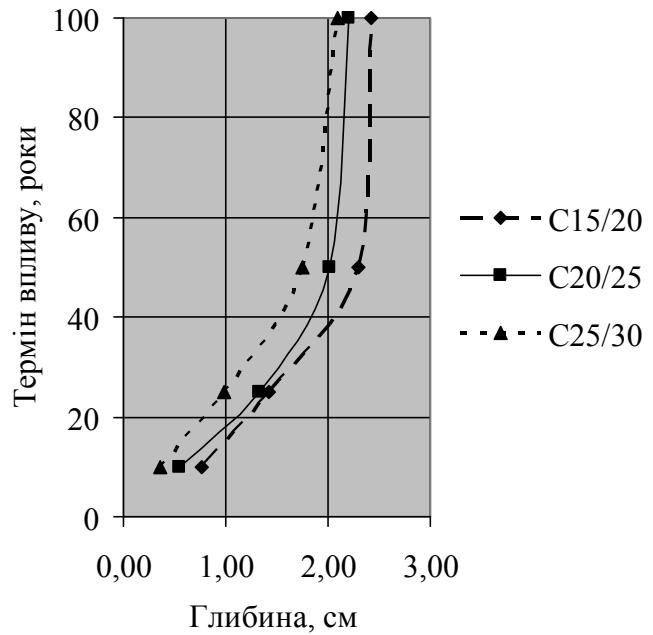
Після довготривалої (30 років) експозиції в 5 % розчині сульфату натрію зразки серій 5 і 6, що містять 88 % і 93 % карбонатного піску, відповідно, характеризуються більш високою міцністю (рис. 8). При цьому міцність на стиск зразків на карбонатному піску в 1,7–3,4 разів вище, ніж зразків на кварцовому піску. Зразки 5 серії з вмістом карбонатного піску 93 % мають найбільшу міцність. Міцність зразків 1-4 серій на кварцовому піску після 30 років випробувань приблизно однакова. Зразки, що весь час витримувались у воді, характеризуються незначним зниженням міцності.

Результати довготривалих експериментальних досліджень довговічності бетону підтвердили позитивний вплив застосування карбонатних заповнювачів на міцність та довговічність бетону при сульфатній корозії. Тим не менше, вищевикладений експеримент проводився в умовах нормальних температур (18-22 °С) і не враховував вплив інших можливих значень на довговічність бетону.

Для дослідження довговічності бетону на карбонатних заповнювачах із урахуванням температури середовища було проведено чисельний експеримент із використанням методики, запропонованої в розділі 2. В якості варійованих параметрів бетону були прийняті: клас міцності і склад бетону конструкції; вид заповнювача (кварцовий або карбонатний пісок). Концентрації агресивних сульфатних розчинів приймалися рівними 15 г/л, 30 г/л та 50 г/л в перерахунку на SO_4^{2-} . Для аналізу були прийняті бетонні суміші класу міцності С15/20, С20/25 та С25/30 на портландцементі марки ПЦ ІІ/А-Ш-400. В результаті моделювання були отримані дані щодо глибини ушкодження (розміцнення) бетону внаслідок сульфатної корозії протягом 100 років впливу агресивного середовища при температурах 15 °С та 25 °С. Отримані дані для бетонів на кварцовому та карбонатному заповнювачах при концентраціях розчину $SO_4^{2-}=30$ г/л та $SO_4^{2-}=50$ г/л та температурах 15 °С та 25 °С приведені у вигляді графіків на рис. 9–10.

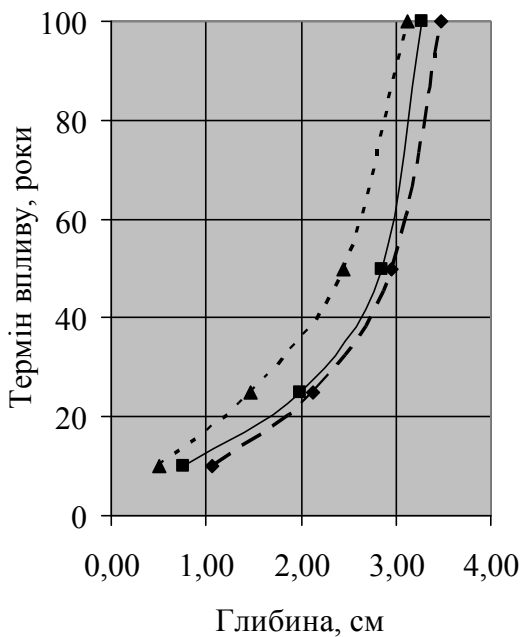


а)

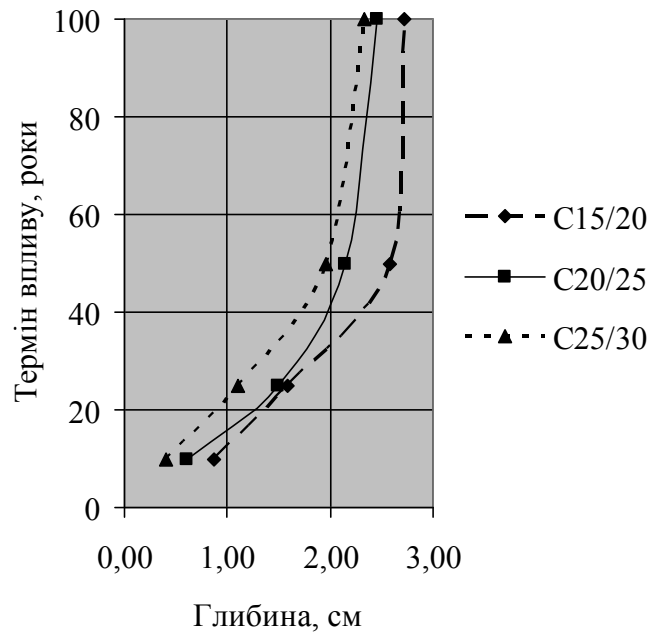


б)

Рисунок 9 – Глибина розміцнення бетону при концентрації $SO_4^{2-}=30$ г/л при температурі 15°C : а) на кварцовому заповнювачі; б) на карбонатному заповнювачі.



а)



б)

Рисунок 10 – Глибина розміцнення бетону при концентрації $SO_4^{2-}=30$ г/л при температурі 25°C : а) на кварцовому заповнювачі; б) на карбонатному заповнювачі.

Для розглянутих параметрів бетонних сумішей при температурі 25°C теоретична глибина розміцнення бетону становить 3,1–3,5 см при концентрації $SO_4^{2-}=30$ г/л та 4,0–4,5 см при концентрації $SO_4^{2-}=50$ г/л, тоді як при температурі 15°C , відповідно, 2,8 – 3,1 см та 3,6 – 4,0 см. Використання в якості заповнювача карбонатного піску веде до зменшення прогнозованої глибини

ушкодження до 2,3–2,7 см при температурі 25 °С та концентрації $SO_4^{2-}=30$ г/л та 3,0–3,5 см при концентрації $SO_4^{2-}=50$ г/л; відповідно, при температурі 15 °С до 2,1–2,4 см та 2,7–3,1 см. Таким чином, шляхом підбору конструктивних та технологічних параметрів конструкції, тобто товщини захисного шару та складу бетону, а також враховуючи реальні температури експлуатації та характеристики агресивного сульфатного середовища, можливо проектувати конструкції із заданим терміном експлуатації.

П'ятий розділ присвячено проведенню оцінювання техніко-економічної ефективності антикорозійного захисту залізобетонних конструкцій в умовах сульфатної корозії з урахуванням температури середовища. Оцінювання було виконано на прикладі влаштування конструкцій пальового фундаменту малоповерхової індивідуальної житлової будівлі. В якості фундаментів будівлі прийняті залізобетонні буронабивні палі діаметром 350 мм довжиною 2,75 м із важкого бетону класу С25/30. Загальна кількість паль становить 42 шт.

Для оцінювання ефективності прогнозування довговічності та застосування первинного антикорозійного захисту прийнято два варіанти мілкого наповнювача бетонної суміші, з якої виготовляються палі: 1) кварцовий пісок; 2) карбонатний пісок. Необхідна товщина захисного шару бетону в умовах сульфатної корозії з урахуванням температури ґрунту становить: для бетону на кварцовому піску – 35 мм; для бетону на карбонатному піску – 25 мм.

Отримані дані щодо витрат та вартості бетону для улаштування залізобетонних паль приведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Техніко-економічні параметри залізобетонних паль

Варіант	Витрата бетону, м ³		Вартість бетону, грн.	
	на од. шт.	загалом	на од. шт.	загалом
Бетон на кварцовому піску	0,27	11,34	372,6	15649,2
Бетон на карбонатному піску	0,23	9,66	343,1	14412,7

Застосування бетону на карбонатному піску для улаштування пальового фундаменту розглянутого малоповерхового індивідуального житлового будинку дозволяє знизити вартість бетону на його виготовлення на 8 %, порівняно з використанням бетону на кварцовому піску.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі викладено науково-обґрунтовані результати досліджень, спрямованих на розв'язання актуальної задачі забезпечення довговічності бетону захисного шару в умовах сульфатної корозії з урахуванням температури середовища.

1. На основі аналізу даних про сучасні методи моделювання процесу корозії та прогнозування довговічності бетону в умовах агресивного впливу

сульфатних розчинів встановлено, що існуючі залежності не враховують вплив температури експлуатаційного середовища на кінетику корозійного процесу.

2. З використанням відомих досліджень та відомостей про механізм корозії бетону в рідких середовищах було запропоновано залежності, що описують кінетику процесу, та розроблено алгоритм прогнозування зміни міцності бетону при сульфатній корозії з урахуванням температури середовища. В результаті чисельного експерименту встановлено вплив температури на інтенсивність корозії та отримані дані щодо розподілу концентрацій взаємодіючих речовин (сульфат-іонів, іонів кальцію, гідроалюмінату кальцію та зв'язаних сульфат-іонів) по глибині бетону від його зовнішньої поверхні. Виконано оцінювання впливу міцності бетону і товщини захисного шару на довговічність залізобетону з урахуванням корозії арматури. У деякому інтервалі величин захисних шарів порівняно невелика зміна товщини захисного шару призводить до різкої зміни довговічності конструкції. Призначення раціональної величини захисного шару бетону і підвищення міцності при розтягуванні бетону в захисному шарі, поряд із щільністю бетону, мають вирішальне значення для підвищення довговічності залізобетонних конструкцій.

3. З урахуванням розподілу температури по глибині ґрунту на прикладі м. Дніпро були отримані ізополя ушкодження захисного шару бетону через 10, 50 та 100 років експлуатації в умовах сульфатної корозії при концентрації SO_4^{2-} 15, 30 та 50 г/л та виконано оцінювання зміни несучої здатності залізобетонної палі в умовах сульфатної корозії. Теоретична несуча здатність через 100 років експлуатації зменшується на 29–33,3 % при концентрації SO_4^{2-} =15–50 г/л відповідно.

4. В рамках довготривалих експериментальних досліджень корозійної стійкості бетону на карбонатних заповнювачах проведено візуальне обстеження та випробування на стиск зразків через 30 років експонування в сульфатному розчині Na_2SO_4 з концентрацією 5 % та воді. Встановлено, що через 30 років випробувань міцність на стиск зразків на карбонатному піску в 1,7–3,4 рази вище, ніж зразків на кварцовому піску. Чисельний експеримент з оцінки довговічності бетону на карбонатних заповнювачах із урахуванням температури середовища показав, що використання в якості заповнювача карбонатного піску веде до зменшення прогнозованої глибини ушкодження на 22–23 %.

5. На основі аналізу чинних норм щодо захисту залізобетонних конструкцій від корозії сформульовано вимоги до заходів із забезпечення довговічності бетону в умовах сульфатної корозії залежно від характеристик агресивності середовища. На прикладі влаштування пальового фундаменту для малоповерхового індивідуального житлового будинку встановлено, що застосування бетону на карбонатному піску дозволяє знизити вартість бетону на його виготовлення на 8 %, порівняно з використанням бетону на кварцовому піску, що підтверджує ефективність запропонованих заходів із забезпечення необхідної довговічності.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Бардах А. Е., Никифорова Т. Д., Савицкий Н. В., Матюшенко И. Н., Назаренко А. О. Инженерная методика расчета прочности и деформаций железобетонных конструкций заглубленных зданий с учетом сульфатной коррозии бетона. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск, 2010. Вып. 56. С. 299–304.

2. Бардах А. Е., Лаухина Л. Н., Савицкий Н. В. Функция условий работы железобетонных конструкций в агрессивных сульфатных средах. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Стародубовские чтения*. Днепропетровск, 2011. Вып. 58. С. 429–435.

3. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Матюшенко И. Н., Никифорова Т. Д. Расчет открытой пористости бетона при агрессивном воздействии сульфатов в зависимости от вида цемента. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск, 2012. Вып. 65. С. 517–520.

4. Bardah A. E., Savytskyi N. V., Shekhorkina S. E. Floating buildings review and design approaches. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Создание высокотехнологичных социозэкокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития*. Днепропетровск, 2013. Вып. 68. С. 376–381.

5. Бардах А.Е., Савицкий Н.В., Шехоркина С.Е., Амир Алани, Карим Лимам. Экспериментальное исследование коррозионной стойкости бетона на карбонатных заполнителях. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск, 2013. Вып. 69. С. 446–450.

6. Бардах О. Ю., Савицький М. В., Нікіфорова Т. Д., Шляхов К. В. Инженерный метод розрахунку міцності згинальних залізобетонних елементів при сульфатній корозії бетону. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепр, 2017. Вып. 100. С. 48–55.

7. Bardakh O., Savytskyi M., Uncik S., Savytskyi A., Shevchenko T., Savytskyi O. Quantitative design methods for protection against corrosion of reinforced concrete structures during various stages of their lifecycle. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 2020. Vol. 28 (3). P. 8–12. URL: <https://doi.org/10.2478/sjce-2020-0018> (*Web of Science*).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Bardakh O., Savytskyi M., Savytskyi A., Shevchenko T., Chernets V. Quantitative design methods of corrosion protection the reinforced concrete

structures at the stages of the lifecycle. *Proceedings of the enviBUILD 2019*. 2020. P. 153–158. URL: <https://doi.org/10.2478/9788395669699-025>.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

9. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Никифорова Т. Д. Новая конструкция поперечного армирования в зоне продавливания монолитной плиты плоского перекрытия колонной. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск, 2007. Вып. 43. С. 477–481.

10. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Никифорова Т. Д., Шляхов К. В., Несин А. А. Вариантное проектирование сборно-монолитного каркаса многоэтажных зданий социального назначения. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск, 2008. Вып. 47. С. 534–537.

11. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Бауск Е. А., Матюшенко И. Н., Несин А. А., Сопильняк А. М. Усиление строительной конструкции здания РДЭС энергоблоков № 1, 2 РАЭС. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск, 2014. Вып. 77. С. 177–181.

12. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Елисеева М. А., Кузьмин Г. И., Новиченко Н. В., Евсеев Е. О. Прочность грунтобетон в зависимости от состава смеси. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. Днепропетровск, 2015. Вып. 82. С. 179–186.

13. Бардах А. Е., Савицкий Н. В., Елисеева М. А., Новиченко Н. В. Факторы, влияющие на качество грунтобетон. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия: Создание высокотехнологичных социоэкокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития*. Днепропетровск, 2015. Вып. 81. С. 177–184.

14. Bardah A. E., Koval' E. A., Savitskiy N. V. Energy saving and ecological aspects in housing construction. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Дніпропетровськ, 2008. № 4-5. С. 51–52.

15. Методология создания устойчивых экопоселений в Украине / Бабенко М. М., Бардах А. Е., Бондаренко О. И., Данишевский В. В., Коваль А. С., Конопляник А. Ю., Никифорова Т. Д., Николаенко С. Н., Мирошниченко К. К., Савицкий А. Н., Савицкий Н. В., Шатов С. В., Шевченко Т. Ю., Шехоркина С. Е.; под. общ. ред. Н. В. Савицкого. Днепр: Приднестр. гос. акад. стр-ва и архитектуры, РоялПринт, 2017. 304 с.

16. Архітектурно-конструктивно-технологічна система 3Д-друку будівельних об'єктів: колективна монографія / М. Савицький, Ш. Айріх, І. З. Халаф, С. Дукат, С. Унчік, Г. Євсєєва, Т. Нікіфорова, С. Шатов, О. Адегов, М.

Бабенко, Є. Бринзін, О. Голубченко, О. Зінкевич, С. Іванцов, О. Коваль, О. Конопляник, М. Ляховецька–Токарева, М. Махінько, І. Перегінєць, О. Савицький, А. Титюк, Є. Юрченко, Т. Шевченко, С. Шехоркіна, К. Шляхов, О. Бондаренко, О. Бардах, М. Бордун, О. Денисенко, О. Лясота, А. Савицький, Є. Соловійова, В. Спіридоненков, В. Чернець; за заг. ред. М. Савицького. Дніпро: ФОП Удовиченко О.М., 2019. 233 с.

АНОТАЦІЯ

Бардах О.Ю. **Довговічність бетону в умовах дії сульфатних розчинів і температури.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали та вироби. Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Міністерства освіти і науки України, Дніпро, 2021.

Викладено науково-обґрунтовані результати досліджень, спрямованих на розв'язання актуальної задачі забезпечення довговічності бетону в умовах дії сульфатних розчинів з урахуванням температури середовища.

Запропоновано математичні залежності, що описують кінетику процесу та розроблено алгоритм прогнозування зміни міцності бетону при сульфатній корозії з урахуванням температури середовища. Запропоновано математичну модель прогнозування руйнування захисного шару бетону продуктами корозії арматури. Встановлено зв'язок між геометричними параметрами конструкції, механічними властивостями бетону і ступенем корозії арматури, що викликає руйнування захисного шару. Для прогнозування довговічності бетону при сульфатній корозії в ґрунтах запропонована розрахункова модель розподілу температури ґрунту по глибині. Приведені результати довготривалих експериментальних досліджень корозійної стійкості бетону на карбонатних заповнювачах. На прикладі улаштування пальового фундаменту для малоповерхового індивідуального житлового будинку встановлено, що застосування бетону на карбонатному піску дозволяє знизити вартість бетону на його виготовлення на 8 %, порівняно з використанням бетону на кварцовому піску, що підтверджує ефективність запропонованих заходів із забезпечення необхідної довговічності.

Ключові слова: довговічність, бетон, сульфатна корозія, температура.

АННОТАЦИЯ

Бардах А.Е. **Долговечность бетона в условиях воздействия сульфатных растворов и температуры.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия. – Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры» Министерства образования и науки Украины, Днепр, 2021.

Изложены научно-обоснованные результаты исследований, направленных на решение актуальной задачи обеспечения долговечности

бетона в условиях воздействия сульфатных растворов с учетом температуры среды.

Предложены математические зависимости, описывающие кинетику процесса, и разработан алгоритм прогнозирования изменения прочности бетона при сульфатной коррозии с учетом температуры среды. Предложена математическая модель прогнозирования разрушения защитного слоя бетона продуктами коррозии арматуры. Установлена связь между геометрическими параметрами конструкции, механическими свойствами бетона и степенью коррозии арматуры, которая вызывает разрушение защитного слоя. Для прогнозирования долговечности бетона при сульфатной коррозии в грунте предложена расчетная модель распределения температуры грунта по глубине. Приведены результаты длительных экспериментальных исследований коррозионной стойкости бетона на карбонатных заполнителях. На примере устройства свайного фундамента для малоэтажного индивидуального жилого здания установлено, что применение бетона на карбонатном песке позволяет снизить стоимость бетона на его изготовление на 8% по сравнению с использованием бетона на кварцевом песке, что подтверждает эффективность предложенных мер по обеспечению необходимой долговечности.

Ключевые слова: долговечность, бетон, сульфатная коррозия, температура.

SUMMARY

Bardakh O. Yu. Durability of concrete in the condition of the influence of sulphate solutions and temperature. – As a manuscript.

Thesis for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.23.05 – building materials and products. – State higher educational establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture» of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2021.

The thesis is devoted to the solution of actual problem of maintenance of durability of concrete in the conditions of sulphate corrosion taking into account temperature of environment.

Using the well-known research and information on the mechanism of corrosion of concrete in liquid media, mathematical dependences describing the kinetics of the process were proposed and an algorithm for predicting changes in concrete strength during sulfate corrosion taking into account the ambient temperature was developed.

Features of penetration of aggressive substances are considered by introduction of effective coefficient of diffusion in a solid body which reflects influence of parameters of structure of concrete, and also temperature on advance of diffusion ions. Based on Arrhenius' law, the dependence of the diffusion coefficient of ions in liquid solution on temperature and the dependence of the diffusion coefficient of sulfates in concrete on the ambient temperature are obtained. It is established that the diffusion coefficient of ions strongly depends on temperature. At temperatures close to zero, diffusion is practically absent. In the temperature range from 1 to 15 °C the diffusion coefficient increases intensively. At values of 20-30 °C, the effect of temperature on the diffusion process becomes less significant. To predict the change

in the strength of concrete during sulfate corrosion taking into account the temperature of the environment, an algorithm for predicting the change in the strength of concrete during sulfate corrosion taking into account the temperature of the environment was developed. As a result of the numerical experiment, data were obtained on the distribution of concentrations of interacting substances (sulfate ions, calcium ions, calcium hydroaluminate and bound sulfate ions) along the depth of concrete from its outer surface.

A mathematical model for predicting the destruction of the protective layer of concrete by reinforcement corrosion products is proposed. The dependences were obtained between the geometric parameters of the structure, the mechanical properties of concrete and the degree of corrosion of the reinforcement, which causes the destruction of the protective layer. The prescription of a rational value of the protective layer of concrete, measures to ensure the design value of the protective layer in the manufacture of reinforced concrete and increase the tensile strength of concrete in the protective layer, along with concrete density, are crucial to increase the durability of reinforced concrete structures. Estimation of the optimal size of the protective layer, made on the basis of the conditions of its destruction of the accumulated corrosion products of reinforcement, coincides with the normalized thicknesses of the protective layers, which are installed on the basis of long-term operation of reinforced concrete structures.

The main factors of soil temperature regime formation, which include the processes of heat supply, transfer, accumulation and heat transfer, are analyzed and systematized. The equation of soil heat balance is formulated. Based on the known data on the total thermal balance of the soil surface, an analytical calculation model of soil temperature distribution over depth is proposed. The model considers long-wave radiation, short-wave radiation (solar radiation absorbed by the surface), soil thermal conductivity (soil heat dissipation), convective heat transfer and evaporation effect.

To predict the durability of concrete with sulfate corrosion in soils, a calculated model of soil temperature distribution by depth is proposed. Taking into account the temperature distribution along the depth of the soil on the example of Dnipro, isofields of damage to the protective layer of concrete after 10, 50 and 100 years of operation in conditions of sulfate corrosion at a concentration of 15, 30 and 50 g/l were obtained. The assessment of the load-bearing capacity of pile in the conditions of sulfate corrosion was conducted. Theoretical bearing capacity after 100 years of operation decreases by 29 – 33,3 % at a concentration $SO_4^{2-} = 15-50$ g/l, respectively.

When designing concrete and reinforced concrete structures intended for operation in aggressive environments, durability should be provided mainly by means of primary protection. The criterion for ensuring the durability of concrete in conditions of sulfate corrosion is a decrease in strength and destruction of the protective layer. In liquid aggressive environment, the durability of concrete is determined by its technological parameters (mineralogical composition of cement clinker, cement composition and permeability of concrete). The use of aggregates

from carbonate rocks due to the peculiarities of their physical and chemical interaction with cement allows obtaining concretes of high sulfate resistance.

The results of long-term experimental studies of corrosion resistance of concrete on carbonate aggregates are presented. The content of carbonate sand and dust particles varied in concrete mixtures. A series of samples for comparative analysis, which were kept in water, was prepared separately. A visual inspection and compression test of the samples after 30 years of exposure to a sulfate solution of Na_2SO_4 with a concentration of 5 % and water. It was found that after 30 years of testing the compressive strength of samples on carbonate sand is 1,7–3,4 times higher than samples on quartz sand. As a result of the numerical experiment, data on the durability of concrete on carbonate aggregates were obtained considering the environment temperature. It was found that the use of carbonate sand as an aggregate leads to a decrease in the predicted depth of damage to 2,3–2,7 cm at a temperature of 25 °C and a concentration $\text{SO}_4^{2-}=30$ g/l and 3,0–3,5 cm at a concentration $\text{SO}_4^{2-}=50$ g/l; respectively, at a temperature of 15 °C to 2,1–2,4 cm and 2,7–3,1 cm. Numerical experiment was performed to assess the durability of concrete on carbonate aggregates based on the environment temperature and showed that the use of carbonate sand as an aggregate leads to a decrease in the predicted depth of damage by 22 – 23 %.

Based on the analysis of current standards for the protection of reinforced concrete structures against corrosion, the requirements for measures to ensure the durability of concrete in conditions of sulfate corrosion, depending on the characteristics of the aggressiveness of the environment, were formulated. Substantiation of protective measures and choice of materials to ensure the durability of concrete and reinforced concrete is performed by technical and economic comparison of design and technological solutions, taking into account the estimated service life and the cost of corrosion protection.

On the example of laying a pile foundation for a low-rise individual house, it was found that the use of concrete on carbonate sand reduces the cost of concrete for its manufacture by 8 % compared to the use of concrete on quartz sand, which confirms the effectiveness of the proposed measures to ensure durability.

Keywords: durability, concrete, sulphate corrosion, temperature.