

ДЕГРАДАЦІЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ МОСТОВИХ СПОРУД: КОРОЗІЙНИЙ АСПЕКТ

Т. О. НЕНАСТІНА¹, К. В. БЕРЕЖНА¹, М. Д. САХНЕНКО²,
С. О. БУГАЄВСЬКИЙ¹

¹ Харківський національний автомобільно-дорожній університет;

² Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

Розглянуто чинники, які спричиняють руйнування залізобетонних конструкцій мостових споруд, зокрема вплив протиожеледних матеріалів, які використовують для безпеки дорожнього руху в зимовий період. Проаналізовано український ринок протиожеледних хімічних реагентів та комбінованих природних і синтетичних засобів. Методом поляризаційного опору досліджено кінетику корозійного руйнування сталей 09Г2С та Ст3 як основних матеріалів арматури у нейтральних хлоридвмісних та лужних розчинах. З урахуванням кінетики корозійного руйнування досліджених сталей визначено швидкість їх корозії.

Ключові слова: *деградація, корозійне руйнування, протиожеледні засоби, арматура залізобетонних конструкцій.*

Factors which cause fracture of reinforced concrete constructions of bridge structures are considered. One of them is anti-icing material used for road safety in the winter period. The Ukrainian market of anti-icing chemical reagents and combined agents of natural and industrial origin was analyzed. The kinetics of corrosion fracture of 09Г2С and Ст3 steels as the main material of reinforcement in neutral chloride-containing and alkaline solutions was investigated using the method of polarization resistance. Taking into account the kinetics of corrosion fracture of the studied steels, the rate of their general corrosion was calculated.

Keywords: *degradation, corrosion fracture, anti-icing agents, reinforcement of reinforced concrete structures.*

Вступ. Зниження вантажопідйомності та довговічності мостових споруд внаслідок фізичного зношування несучих конструкцій є актуальною проблемою впродовж останніх десятиліть. Особлива її значущість у тому, що мости, тунелі та греблі, порівняно з іншими залізобетонними спорудами, мають бути довговічними та мати значно вищі терміни безаварійної експлуатації, особливо в умовах російської навали. Для успішної протидії деградації, яка зумовлює зношування конструкцій, необхідно розуміти її природу та оцінювати інтенсивність, а також вплив на вантажопідйомність та довговічність мостів.

Відомо чимало фактів щодо схильності бетону до руйнування під впливом різних чинників, яке призводить до погіршення захисної функції арматури, а також суттєво впливає на довговічність конструкції, оскільки первинні руйнування бетонного каменю та корозія арматури можуть виникати на мостових спорудах вже в перші 5 років експлуатації [1]. Середній термін експлуатації для арматури залізобетонних конструкцій до початку корозії за різними джерелами [1, 2] становить від 5 до 15 років. Це викликано водопроникністю бетону, проникненню агресивних газів і солей, а також схильністю до карбонізації [1]. Для мостів та шляхопроводів зі застарілими видами гідроізоляції (толь, бітумна гідроізоляція) без

організованого водовідведення одним з найзначущих чинників, які спричиняють руйнування бетону та корозію арматури, є потрапляння опадів та інших рідких середовищ. Окрім того, важливу роль відіграє розташування мостової споруди (морське узбережжя – через підвищений відсоток солей, промислові райони – агресивні речовини у повітрі, міста – використання протиожедних речовин тощо). Корозія арматури може розпочатись після руйнування захисного шару бетону (або до його руйнування, якщо, наприклад, водонепроникність бетону недостатня). Вплив складу бетону та технології його виготовлення на корозійний стан сталеві арматури і довговічність залізобетонних конструкцій проаналізовані раніше [1, 2]. Так, зазвичай захисний шар бетону завдяки вмісту гідроксиду кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$ має лужний характер та ефективно захищає арматуру від корозії. Але, якщо бетон карбонізується, лужність знижується, порушується його структура і арматура починає кородувати під впливом атмосферних чинників [3]. Результати таких процесів спостерігаємо на багатьох конструкціях мостових споруд (рис. 1).



Рис. 1. Результати руйнування захисного шару бетону та корозія арматури Бурсацького мосту у Харкові.

Fig. 1. Results of fracture of the protective concrete layer and corrosion of the reinforcement of the Bursat bridge in the city of Kharkiv.

Одним із чинників, які пришвидшують руйнування залізобетонних конструкцій, є використання протиожедних матеріалів для безпеки дорожнього руху в зимовий період. Ці матеріали потрапляють на мостові споруди на автомобільних дорогах як з коліс автотранспорту, так і безпосередньо через розсипання реагентів на мостове полотно та тротуари. Засоби боротьби з обмерзанням можна поділити на три основні групи: фрикційні матеріали, хімічні продукти та фрикційно-хімічні реагенти. Найчастіше у зимовий період на автомобільних дорогах проти ожедді в ролі реагентів використовують хімічні матеріали, внаслідок чого агресивні соляні розчини потрапляють на бетонні поверхні транспортних споруд, зростає концентрація солей, які забруднюють ґрунт та ґрунтові води. Мета роботи – проаналізувати означені чинники і їх вплив на корозійну тривкість сталей, які використовують у мостових конструкціях.

Експериментальна частина. Як об'єкти дослідження обрали зразки сталей, які найчастіше використовують як арматуру (табл. 1). Визначали корозійну трив-

кість матеріалів у лабораторних умовах методом поляризаційного опору, реєструючи анодні і катодні вольтамперограми [4, 5]. Корозійні випробування здійснювали у модельних розчинах складу: 3%-ий розчин натрію хлориду (рН 6,8) та 1М розчин Na_2SO_4 із додаванням NaOH до рН 11. Допоміжним електродом під час поляризаційних вимірювань була платинова спіраль, електродом порівняння – хлоридсрібний напівелемент типу ЭВЛ–1М1 [6]. Швидкість сканування потенціалу за поляризаційних вимірювань 2 mV/s.

Таблиця 1. Хімічний склад досліджуваних матеріалів на основі заліза

Матеріал	ДСТУ	Елемент, mass%									
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	Cu	As
Ст3	2651	0,14... 0,22	0,15... 0,3	0,4... 0,65	$\leq 0,04$	$\leq 0,05$	$\leq 0,3$	$\leq 0,3$	$\leq 0,01$	$\leq 0,3$	–
09Г2С	7809	$\leq 0,12$	0,5... 0,8	1,3... 1,7	$\leq 0,03$	$\leq 0,04$	$\leq 0,3$	$\leq 0,3$	–	$\leq 0,25$	$\leq 0,08$

Поляризаційні дослідження виконували, використовуючи потенціостат МТех PGP-550S з програмним забезпеченням [7]. Густина струму корозії $j_{\text{кор}}$ визначали екстраполяцією точки перетину лінійних ділянок парціальних анодних і катодних поляризаційних залежностей за потенціалу корозії $E_{\text{кор}}$ у тафелівських координатах $\lg j - \Delta E$. За визначеним значенням струму корозії розраховували глибинний показник швидкості корозії k_h .

Результати та їх обговорення. Аналіз сучасного українського ринку протиожеледних матеріалів та комбінованих засобів свідчить (табл. 2), що до їх складу входять різноманітні хімічні реагенти природного та промислового походження. Принцип їх дії полягає в тому, що вони зменшують температуру замерзання води, прискорюють топлення снігу/льоду на мостах, а також проникають у структуру замерзлої води, руйнуючи зв'язки між кристалами, що зменшує силу вмерзання снігу та льоду в мостове покриття.

З огляду на вартість та доступність хімічних протиожеледних засобів, які застосовують для створення безпечних умов для пересування транспорту під час ожеледі на проїжджій частині мостів, найпоширенішими залишаються, незважаючи на екологічну небезпеку та хімічну агресивність, реагенти на основі хлоридів металів, які є основним джерелом хлоридного впливу на конструктивні елементи мостових споруд.

Як бачимо, корозійний стан сталеві арматури залізобетону (рис. 2), зокрема швидкість її корозійного руйнування ($V_{\text{кор}}$), зумовлені впливом декількох чинників та їх інтенсивністю. До них належать: компонентний склад корозивного середовища (c_i), який визначає хімічні потенціали складників (μ_i), рН порового простору, транспортні характеристики газоподібних і водорозчинних реактантів (D_i), інтенсивність механічних навантажень (F), температура експлуатації (T), товщина бетонного шару (δ), тривалість експлуатації (t_i) та низка інших чинників

$$V_{\text{кор}} = f(\mu_i, \text{pH}, D_i, F, T, \delta, \theta, t_i \dots) .$$

З урахуванням вищезазначеного, деградацію системи, яка призводить до вичерпання її ресурсу і втрати конструкцією функціонального призначення, можна, як використано раніше для системи метал–захисне полімерне покриття [8], подати орієнтованим графом $G(S, t)$. Елементи такого топологічного графа S_i відповідають окремим станам системи – насичення дифузантами, змінення рН нижче припустимого рівня, локальний перебіг анодних та катодних реакцій корозії, відша-

рування бетонного шару тощо. Цілком ймовірно, що інтенсивність відновлення системи близька до нуля, тому інтенсивностями зворотних переходів можна нехтувати. Крім цього, інтенсивності переходів між окремими S_i відображають кінетичні закономірності кожного з етапів процесу, хоча їх значущість та внесок у скорочення терміну безвідмовної експлуатації мостової споруди можуть суттєво різнитись. Одночасна дія декількох чинників, що є найпоширенішим випадком в умовах експлуатації, імовірно провокує реалізацію синергетичного ефекту, який суттєво пришвидшує відмову об'єкта.

Таблиця 2. Технічні характеристики протижеледних хімічних реагентів

Хімічна формула	Допустима робоча температура повітря, °C	Витрата реагенту за температури 10...15°C, g/m ²	Агрегатний стан	Ціна, grn/kg
Хлориди				
NaCl	до -15	40...100	тверді	20
CaCl ₂	до -35	45...80	тверді	33
MgCl ₂ · 6H ₂ O	до -20	20...60	тверді	30
Ацетати				
CH ₃ COOK	до -40	30...70	розчин	420
CH ₃ COONH ₃	до -35	20...50	розчин	120
Карбаміди				
NH ₄ NO ₃ ·(NH ₂) ₂ CO·H ₂ O	до -8	60...115	розчин	55
Нітрати				
Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	до -12	40...200	тверді	65
Ca(NO ₃) ₂	до -10	50...130	тверді	32
Форміати				
CHOOK	до -20	40...120	розчин	148

Розглянемо докладніше формалізований опис досліджуваної системи (рис. 3), яка з початком експлуатації переходить з вихідного стану S_0 ($t = 0$) у стан на початку експлуатації S_1 ($t > 0$) з інтенсивністю λ_{01} .

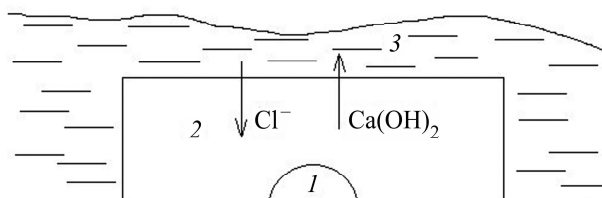


Рис. 2. Система “арматура (1)–бетон (2)–агресивне середовище (3)”.

Fig. 2. System “reinforcement (1)–concrete (2)–aggressive environment (3)”.

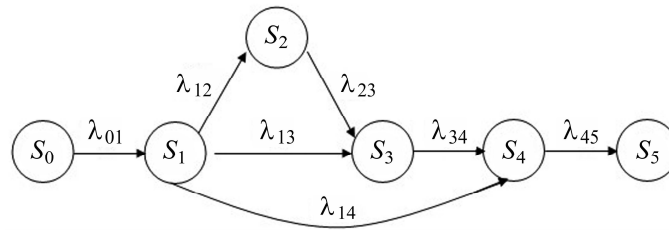


Рис. 3. Топологічний граф системи “арматура–бетон–агресивне середовище”, який відображає її деградацію в часі.

Fig. 3. Topological graph of the “reinforcement–concrete–aggressive environment” system, which reflects its degradation with time.

Як відзначали, найзначущішою загальною причиною руйнування бетону є його карбонізація, яка призводить до структурних змін [8]. Внаслідок поруватості він добре поглинає карбон (IV) оксид CO_2 , кисень і вологу, які присутні в атмосферному повітрі та переходить у стан S_2 . Якщо концентрація вуглекислого газу невелика, утворюються нерозчинні карбонати кальцію, об’єм яких приблизно на 12% перевищує об’єм вихідного кальцій гідроксиду. За дії CO_2 продукти корозії заповнюють порожнини і цементувальну частину бетону, ущільнюючи структуру, зменшуючи поруватість та збільшуючи міцність нейтралізованого шару [9]. Однак підвищений вміст вуглекислого газу може призводити до розчинення $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з утворенням кальцій гідрокарбонату, який вимивається з бетону, що провокує зростання поруватості та знижує його міцність. Паралельно цьому процесу знижується рН рідкої фази в бетоні (до 11...11,5), що викликає зменшення або повну втрату пасивувальної дії бетону, і як наслідок, спричиняє корозію сталевих арматур. Реалізації означеної сукупності явищ відповідає стан S_3 . Спільна дія CO_2 та хлорид-іонів, які є в складі хімічних протиожеледних реагентів, призводить до утворення, крім карбонатів, також і кальцій гідрокарбоалюмінату, кальцій гідрохлоралюмінату та кальцій хлориду. Водночас карбонізація бетону своєрідно впливає на кінетику проникнення хлоридів, з одного боку, бетон ущільнюється, що пригальмовує дифузію хлоридних солей, але з іншого – відсутність у карбонізованому шарі кальцій гідроксиду анігілює зв’язування хлоридів, що призводить до прискорення їх дифузії в бетон. Таку трансформацію стану відображає перехід $S_1 \rightarrow S_3$ з інтенсивністю λ_{13} (рис. 3).

Хлоридвмісне середовище спричиняє корозійне руйнування матеріалу несучих конструкцій, суттєво змінює його механічні характеристики, що в результаті зумовлює істотне зниження несучої здатності, зменшення надійності та скорочення довговічності конструкцій. Згодом агресивні речовини просочуються крізь пори, структурні дефекти, які утворюються за руйнування бетону під час корозії, до поверхні арматурних стрижнів [10]. Прискорення корозії арматури сприяє утворенню мікротріщин у бетоні або його частковому руйнуванню [11] та втраті адгезійного зв’язку і відшаруванню бетонного покриття. Таку трансформацію стану системи відображає перехід $S_3 \rightarrow S_4$ з інтенсивністю λ_{34} . Корозійний процес на сталі може відбуватись за електрохімічним механізмом тоді, коли створюються умови для перебігу парціальних стадій катодної деполяризації і анодного розчинення [12]. Це можливо за умов порушення цілісності пасивної плівки та безпосереднього контакту металу з киснем, що сприяє утворенню мікрогальванопар. Руйнування пасивної захисної плівки можливо за зниження рН порової рідини нижче 11,8 та проникнення до поверхні сталі агресивних хлорид-іонів. Корозія арматури починається після руйнування пасивної плівки (депасивації), яке

відбувається після досягнення граничного рівня концентрації хлорид-йонів ($0,2...1,3\text{kg/m}^3$) [13, 14].

Завершенням корозійного руйнування несучої конструкції є перехід у стан S_5 , який і відображає втрату нею функціонального призначення.

Щоб встановити вплив агресивного середовища на роботоздатність конструкційних елементів мостів, досліджували корозійну поведінку матеріалів арматури залізобетону, а саме, вуглецеву Ст3 та низьколеговану 09Г2С сталі (рис. 4). Ці матеріали є розповсюдженими та економічно доцільними і їх використовують для спорудження мостових конструкцій. Як агресивне середовище застосовували 3%-ий розчин натрій хлориду, який в лабораторних умовах дає змогу моделювати умови використання протиожеледних реагентів на основі хлорид-йонів, а також розчин натрій гідроксиду з рН 11, який імітує зниження рН рідкої фази бетону за його карбонізації. Аналіз результатів свідчить (табл. 3), що найсуттєвіша різниця стаціонарних електродних потенціалів для кожної сталі є за зміни складу модельного середовища. Очікувано, що найпозитивнішими є потенціали корозії зразків у лужному середовищі, а найвід'ємнішими – у нейтральному.

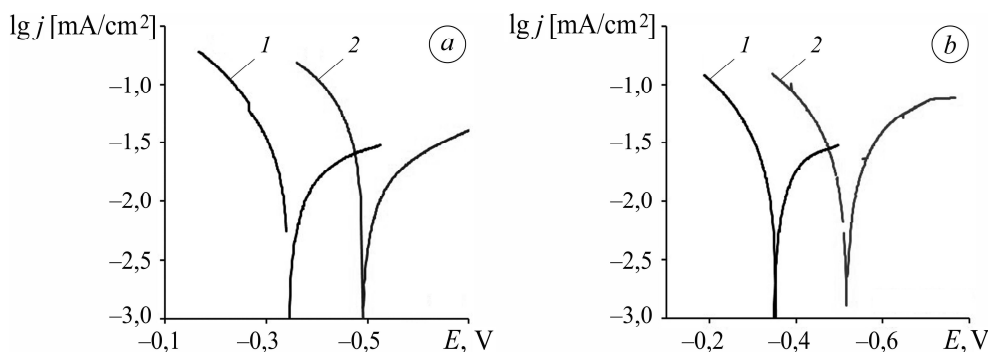


Рис. 4. Поляризаційні залежності сталей Ст3 (а) та 09Г2С (b) у лужному (1) та нейтральному середовищах (2).

Fig. 4. Polarization dependences of Ст3 (a) and 09Г2С (b) steels in alkaline (1) and neutral environments (2).

Коефіцієнт b , який пов'язує поляризаційний опір зі силою струму корозії, практично не залежить від кислотності розчину в досліджуваних межах і становить $\sim 0,011...0,014$. У нейтральному середовищі за присутності хлорид-йонів реалізується локальний корозійний процес, який супроводжується залуженням поверхневого шару електроліту внаслідок спряженої реакції відновлення кисню і руйнуванням захисного пасивного шару металів.

Таблиця 3. Корозійні характеристики сталі

Сталь	рН 6,8			рН 11		
	$E_{\text{сопг}}$, V	R_p , kΩ	k_h , mm/years	$E_{\text{сопг}}$, V	R_p , kΩ	k_h , mm/years
Ст3	-0,53	2,14	0,19	-0,36	2,61	0,17
09Г2С	-0,50	1,88	0,22	-0,38	2,43	0,19

Проаналізувавши діаграму Пурбе (E -рН) для заліза як основного матеріалу сталей, можна оцінити імовірність корозійних процесів і підтвердити початок розчинення заліза в нейтральному середовищі. При рН 11 поверхня заліза залишається хімічно стійкою, оскільки частково вкрита пасивною плівкою $\text{Fe}(\text{OH})_3$,

яка захищає конструкцію від корозії. За наявності тріщин або збільшенні поруватості бетону, які полегшують проникнення агресивних речовин до сталевій арматури, недостатньої товщини шару бетону, використання протиожеледних засобів на основі хлорид-йонів створюються умови для виникнення та інтенсивного перебігу корозійних процесів. Визначення швидкості та відсотку корозії арматури залізобетонних конструкцій або сталевих елементів мостів дає можливість встановити відсоток зносу конструкції, а отже, виконати експлуатаційну оцінку моста в цілому [15, 16]. Саме з урахуванням означених чинників можна прогнозувати швидкість корозії залізобетонних конструкцій. Для цього необхідно визначити середню швидкість корозії сталі, умови вологості місцевості, агресивність навколишнього середовища, зниження швидкості корозії для залізобетонних конструкцій (наявність захисного шару бетону, його класи за міцністю та водонепроникністю). Оскільки під час експлуатації характер агресивного впливу на мости практично не змінюється, швидкість корозії можна вважати сталою, а корозійний процес – лінійним.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано головні чинники деградації залізобетонних конструкцій мостових споруд та їх вплив на руйнування металевій арматури. До найзначущіших належать: застосування хлоридвмісних протиожеледних реагентів та водо- і газопроникність бетону головно для кисню та оксиду (IV) карбону. За їх одночасної дії в умовах експлуатації відбувається карбонізація бетону та зниження рН порового простору, які спричиняють депасивацію сталевій поверхні та корозійні процеси. Експериментальні дослідження корозійної тривкості зразків сталей Ст3 та 09Г2С як основних конструкційних матеріалів залізобетону довели відмінність їх поведінки у лужному та нейтральному середовищах, оскільки швидкість корозії зростає антибатно до рівня рН корозивного середовища. Для успішної протидії деградації, яка зумовлює зношування конструкцій мостів, необхідно використовувати інгібітори корозії, гідрофобізатори та розчини для ущільнення бетону.

1. Коваль П. М., Зеленовський В. А. Вплив складу бетону на корозійний стан сталевій арматури та довговічність залізобетонних конструкцій // Автомобільні дороги. – 2019. – № 1 (257). – С. 33–39. DOI: 10.33868/0365-8392-2019-1-257-33-39
2. Троян В. В. Технологічні основи підвищення та прогнозування довговічності бетонів для масивних споруд. – К.: Інтерсервіс, 2017. – 238 с.
3. Бугаєвський С. О., Кіслов О. Г., Чугуєнко С. А. Підвищення захисної дії бетону мостових конструкцій по відношенню до арматури // Вісник ХНАДУ. – 2007. – Вип. 39. – С. 98–101.
4. Ryabtsev S. I., Polonskyi V. A., and Sukhova O. V. Structure and corrosion of quasicrystalline cast alloys and Al–Cu–Fe film coatings // Materials Science. – 2020. – **56**, № 2. – P. 263–272. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00428-8>
5. Corrosion and electrochemical properties of binary cobalt and nickel alloys / M. V. Ved', T. O. Nenastina, V. V. Shtefan, T. M. Bairachna, and M. D. Sakhnenko // Materials Science. – 2008. – **44**, № 6. – P. 840–843. <https://doi.org/10.1007/s11003-009-9141-3>
6. Nanostructured functional coatings of iron family metals with refractory elements. Nanotechnology, biotechnology, nanomaterials, and their applications / M. V. Ved', N. D. Sakhnenko, I. Y. Yermolenko, and T. A. Nenastina // NANO 2018. – Springer Proc. in Physics, 2018. – **214**. – P. 3–34. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92567-7_1
7. Майзеліс А. О., Пацай І. О. Використання функції потенціостата MTech PGP-550S нелінійної поляризації за заданими даними // Електрохімія сьогодення: здобутки, проблеми та перспективи: колективна монографія. – К.: МПБП “Гордон”, 2021. – 192 с. DOI: 10.33609/978-966-8398-64-3.01.2021.1-191
8. Технічна діагностика матеріалів і конструкцій / За заг. ред. акад. НАН України З. Т. Назарчука. Т. 6: Електрохімічні методи моніторингу деградації матеріалу конструкцій / В. І. Похмурський, І. М. Дмитрах, М. С. Хома, О. Т. Цирульник, І. М. Зінь, М. Д. Сахненко, Ю. С. Герасименко. – Львів: Простір-М, 2017. – 300 с.

9. Карбонізація бетону і корозія арматури залізобетонних конструкцій підземних каналізаційних систем / В. Макаренко, В. Гоц, Т. Хомутецька, Ю. Макаренко, Т. Аргатенко, І. Прибитько, О. Панченко // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2021. – № 37. – С. 47–46. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2021.37.47-56>
10. Матченко П. Т. Інженерна методика розрахунку залишкового ресурсу захисного шару бетону робочої арматури залізобетонних конструкцій, що експлуатуються // Будівництво України. – 2010. – № 12. – С. 102–115.
11. Vesikari E. Carbonation and Chloride Penetration in Concrete – with Special Objective of Service Life Modelling by the Factor Approach // Research report VTT-R-04771-09. – Finland, 2009. – 38 p.
12. Chaparro W. A., López E. V., and Gutiérrez R. M. Corrosion behavior of steel bar embedded in alkali activated slag concrete subjected to carbonation and chloride attack // Dyna rev. fac. nac. minas. – 2012. – **79**, № 171. – P. 80–87.
13. Influence of the contents of refractory components on the corrosion resistance of ternary alloys based on iron and cobalt / Y. I. Sachanova, I. Y. Ermolenko, M. V. Ved', T. O. Nenastina, and G. S. Yar-Mukhamedova // Materials Science. – 2019. – **54**, № 4. – P. 556–566. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00218-x>
14. Jin Z. Q., Sun W., and Li Q. Y. Effect of carbonation on chloride diffusion in concrete // J. of University of Sci. and Techn. – 2008. – **8**, № 30. – P. 921–925. DOI: 10.13374/j.issn1001-053x.2008.08.023
15. Miyazato S. and Nobuaki O. Steel corrosion induced by chloride or carbonation in mortar with bending cracks or joints // J. of Adv. Concrete Techn. – 2010. – **8**, № 2. – P. 135–144. DOI:10.3151/jact.8.135
16. ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012. Споруди транспорту. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. – К.: Мінрегіонбуд України, 2013. – 45 с.

Одержано 24.07.2023