

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ БІОКОРОЗІЇ БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

В.В. Шкапенко¹, О.Г. Мусич¹, О.С. Дем'янюк², А.А. Благініна²

¹ ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»

² Інститут агроекології і природокористування НААН

Встановлено, що світові втрати від біопшкоджень є значними, більше половини яких становлять саме мікробіологічні пошкодження, що спричиняє порушення структурних та функціональних характеристик матеріалу. Зміна властивостей або характеристик матеріалу відбувається внаслідок хімічних реакцій, спровокованих самими мікроорганізмами за взаємодії з матеріалом. Найбільш розповсюдженими та корозійно-активними мікроорганізмами є три групи бактерій: аеробні, анаеробні, силікатні. Оскільки основні біопшкодження будівельних промислових матеріалів залежать від кородованого матеріалу та умов його перебування, актуально залишається розробка як загальних, так і специфічних адресних підходів захисту від мікробіологічної корозії.

Ключові слова: бетон, мікроорганізми, корозія, засоби захисту.

Бетон широко застосовується у будівництві об'єктів різного призначення. Незважаючи на їх міцність, з часом втрачаються його властивості за дії різних видів корозії, що спричиняє руйнування відповідних конструкцій. На стійкість бетону значний вплив мають температурні коливання, атмосферні опади та гази, однак найбільш агресивним впливом відрізняється біологічна корозія. Біокорозія уражає підземні та надземні бетонні споруди, обладнання нафтової промисловості, паливні системи літаків, трубопроводи, що контактують з ґрунтом і водними середовищами тощо.

Інтенсивний розвиток біокорозії бетону та залізобетону спостерігається в умовах техногенних середовищ на підприємствах агропромислового комплексу (м'ясокомбінатах, молокозаводах, хлібозаводах, винзаводах, птахофабриках, тваринницьких фермах тощо). Висока вологість повітря, наявність органічних речовин (білків, жирів, вуглеводів і продуктів їх гідролізу), сечовини, аміаку, вуглекислого газу, розчинів солей створюють сприятливі умови для інтенсивного розвитку корозійно-активних

мікроорганізмів. До того ж поєднуються процеси хімічної корозії внаслідок впливу агресивних речовин, що контактують з будівельним матеріалом, з біологічною корозією через виділення органічних речовин (кислот, амінокислот, ферментів тощо) під час метаболізму мікроорганізмів, що розвиваються на поверхні матеріалів [1].

У процесі масштабного будівництва, яке здебільшого проводиться без попередньої екологічної експертизи, мікробіота ґрунту зазнає значних комплексних техногенних навантажень. Порушується екологічна рівновага. Змінюються звичні умови існування аборигенних форм ґрунтових мікроорганізмів.

Екологічний аспект щодо біокорозії бетонних конструкцій полягає у встановленні механізмів біокорозійного процесу, який безпосередньо залежить від зміни звичних умов існування мікроорганізмів, унаслідок чого відбувається порушення їх природного видового балансу. Тому особлива увага приділялась вивченню складу корозійно-активних сукупностей мікроорганізмів, визначенню механізмів, що спричиняють залучення ґрунтових бактерій до корозійних процесів, та пошуку критеріїв, які да-

ють змогу провести оцінювання ступеня їх корозійної активності [2].

Виняткова поширеність та специфічність біокорозії потребує термінового корегування параметрів активного проти-корозійного захисту відповідно до рівня біологічної активності ґрунтів та передбачає певні обмеження у використанні захисних покриттів та промислових інгібіторів корозії. Розробка таких комплексних антикорозійних заходів має за мету звести до мінімуму ті негативні наслідки, що можуть виникати в ґрунтах унаслідок порушення екологічної рівноваги [3, 4].

Глобальні екологічні проблеми, посилення їх впливу на довкілля потребують нових рішень в аспекті сучасної ресурсоемної промисловості створювати такі матеріали і речовини, які за фізико-хімічними властивостями є небезпечними для мікроорганізмів, стійкими до їх дії.

Нині розроблено значну кількість різноманітних засобів захисту, однак всі вони мають певні недоліки. Проблема біокорозії та біопшкоджень матеріалів досі залишається актуальною.

Мета роботи — узагальнити результати наукових досліджень стану біокорозії промислових споруд для запобігання небезпеці від мікробіологічних агентів та агресивних компонентів навколишнього природного середовища.

Мікробіологічне пошкодження — це порушення структурних та функціональних характеристик матеріалу під впливом продуктів метаболізму мікроорганізмів. Зміна властивостей, або характеристики матеріалу, відбувається внаслідок хімічних реакцій за взаємодії мікроорганізму з матеріалом. Розвиток мікроорганізмів на поверхні матеріалу або в його тріщинах руйнує чи розчиняє цей матеріал [5–7].

Мікроорганізми, що провокують біокорозію промислових матеріалів, є різноманітними та специфічними за своєю дією, видами корозії та умовами перебігу самого процесу, що ускладнює вжиття превентивних заходів від їх руйнівного впливу. Пошук адресної протидії біоагентам руйнації залежно від специфічних особливостей і

матеріалу, а також мікроорганізмів, і досі залишається актуальним завданням для науковців [8–10].

У природі не існує «неспрацьованих» матеріалів, і мікроорганізми виступають своєрідними каталізаторами руйнівних реакцій, синтезуючи на поверхні матеріалу продукти метаболізму, агресивні сполуки залежно від приналежності мікроорганізмів до конкретної таксономічної чи фізіологічної групи, концентрація яких за відсутності мікроорганізмів є доволі низькою або дорівнює нулю.

Біокорозію поділяють на бактеріальну, що відбувається у водних середовищах за наявності особливого виду бактерій (у ґрунті, воді, паливі), та мікологічну (грибну) — в атмосферних умовах за контакту з ґрунтом, зволоження поверхні, наявності забруднень, міцелію і продуктів життєдіяльності грибів [11].

Бактеріальна корозія відбувається при температурі 6–40°C, рН = 1–10,5 за наявності органічних та неорганічних речовин, до складу яких входять елементи, як-от: вуглець, сірка, азот, фосфор, калій, залізо, водень, кисень та ін. Руйнування матеріалу прямо або побічно обумовлено життєдіяльністю бактерій: на поверхні матеріалу або в розчині утворюються агресивні хімічні сполуки; змінюється електрохімічний потенціал середовища внаслідок змін концентрації кисню в розчині. Мікроорганізми швидко розмножуються і легко пристосовуються до мінливих фізичних, хімічних і біологічних умов середовища. Це пояснюється здатністю бактерій утворювати ферменти, необхідні для трансформації поживних середовищ [7, 9, 11].

Значущими в біологічній корозії бетону є такі групи мікроорганізмів:

- *Аеробні кислотоутворювальні бактерії, тіонові бактерії* — становлять основу виникнення корозії бетону та вилуговування цінних металів із сульфідної мінеральної сировини в гірничо-видобувній промисловості. Кислоти, як екзометаболіти бактерій, надходять у навколишнє природне середовище за прямого контакту з матеріалом або через водний розчин, який

контактує з матеріалом. Тіонові бактерії окислюють сірчані сполуки, утворюючи сірчану кислоту; нітрифікувальні бактерії окислюють амоній та нітрит, утворюючи азотну кислоту. Ріст та розвиток тіонових бактерій не залежить від наявності органічних сполук, тому що хемоавтотрофи живляться вуглецем атмосфери через вуглекислий газ або взаємодіючи з карбонатами, які входять до складу бетону [9, 11].

Механізм дії біогенної сірчаної кислотної корозії полягає в тому, що легкі сполуки сірки (H_2S , органічні полісульфіди) перетворюються бактеріями через проміжну ланку у вигляді елементарної сірки. Сірчана кислота виробляється бактеріями роду *Thiobacillus*, яких називають «пожирачами бетону».

Механізм вироблення сірчаної кислоти і корозії бетону полягає в утворенні летких сполук сірки H_2S , що здійснюється бактеріями в анаеробних умовах (без кисню), із сульфатів у стічних водах за такою реакцією: $2CH_3-SHON-COONa + MgSO_4 \rightarrow 2CH_3COONa + MgO + H_2S \uparrow + CO_2 \uparrow + H_2O$. Аеробні бактерії (*Thiobacillus*), що містяться на вологих бетонних стінах, біохімічно окислюють H_2S до H_2SO_4 . Кислота зумовлює руйнування бетону внаслідок її взаємодії з кристалогідратами цементного каменю і утворення гіпсу та еtringіту, які збільшуючись в об'ємі до 2,5 раза спричиняють появу внутрішніх напружень, вищих за міцність бетону [4–6].

• *Група анаеробних сульфатредуквальних бактерій.* Джерелом сірки для утворення сірководню є сульфат, що входить до складу мінералів або надходить із середовища, де міститься бетон.

• *Бактерії, з'явившись в одному місці, швидко збільшують ареал заселення.* Сірководень, як найбільш агресивний до металу, утворює з останнім сульфід. Сірководень є небезпечний тим, що впливає на каркас залізобетонних споруд, окислюється на повітрі і стає субстратом для утворення корозійно-агресивної сірчаної кислоти [8–9].

• *Силікатні бактерії* – аеробні мікроорганізми з широким спектром агресивних екзометаболітів, найбільш стійкі, довгоживучі, у вигляді спор добре переживають всі негаразди навколишнього природного середовища.

• *Анаеробні азотфіксувальні бактерії* значно знижують міцність бетону. Вони утворюють масляну кислоту, яка також є агресивною. У цьому разі зменшується міцність зчеплення складових частин каменю внаслідок утворення олеату кальцію, і відбувається розкладання вапна та гідратних новоутворень під впливом іонів водню.

• *Уролітичні бактерії* також становлять загрозу для бетону. Вони діють, в основному, на сечовину (що міститься в стічних водах), гідролізують її, виділяючи аміак і вугільну кислоту. Аміак може взаємодіяти за наявності вапна цементу із сульфатами води й утворювати легкорозчинну сіль $CaSO_4 \cdot (NH_4)_2 \cdot SO_4 \cdot 3H_2O$ [7, 11].

Слід зауважити, що домінуючі групи мікроорганізмів змінюються залежно від типу та марки бетону, різних систем розміщення та умов зберігання матеріалу. Так, на освітленій сухій ділянці об'єкта переважають фотосинтезуючі ціанобактерії та *Rubrobacter* sp., а на вологій затемненій – кислотоутворювальні бактерії. Кількісно бактеріальне різноманіття представлено так: *Acidithiobacillus* > *Leptospirillum* > *Halothiobacillus* > *Thiomonas* > *Pseudomonas* > *Delgita*, а основним розповсюдженим біоагентом є сульфатредуквальні бактерії [7].

Пошкодження будівельних матеріалів бетонних споруд часто зумовлено метаболізмом неспецифічних бактерій, які не використовують безпосередньо сполуки самого матеріалу. Але для кожного матеріалу існують найтипівіші групи мікроорганізмів з утворенням характерних для нього дефектів.

Мікологічну корозію, на відміну від бактеріальної, зумовлено особливістю життєдіяльності грибів, а саме наявністю ферментативного апарату, що виробляє

ферменти. Грибам властиво наявність усіх груп відомих нині ферментів, тому вони руйнують майже всі органічні матеріали, що трапляються на їх шляху. Швидкість корозії зростає відповідно до накопичення води, забруднень, чисельності і активності мікроорганізмів.

Видове різноманіття грибів, їх висока пристосованість до умов середовища призводить до того, що обсяг матеріалів, ушкоджених грибами, значно перевищує обсяг руйнувань, стимульованих бактеріями.

Якщо для розвитку перелічених вище бактерій необхідними є спеціальні умови, то для розвитку грибів достатньо незначного забруднення і тимчасового підвищення вологості [11–13].

Гриби розвиваються в доволі широкому температурному інтервалі – від 0 до +45°C, а гриби-термофіли за вищих температур. Деякі гриби-психрофіли можуть розвиватися і за нижчих температур. Негативний вплив на розвиток грибів зумовлює сильний рух повітря, оскільки перешкоджає фіксації спор на поверхні матеріалу та пошкоджує міцелій. Також на розвиток грибів негативно впливає значна зміна рН середовища.

Повітряне середовище, що містить CO₂, NH₃, етиловий спирт C₂H₅OH та інші речовини, стимулює розвиток деяких видів грибів. Оскільки вода становить основну частину клітинного тіла гриба, саме вона є основним чинником, що посилює їх розвиток. Пил, що осідає на поверхні конструкції, містить спори грибів і органічні сполуки, необхідні для харчування грибиці [7, 11, 14].

На поверхні бетонних будівельних конструкцій переважають представники родів *Penicillium*, *Aspergillus*, *Trichoderma*, *Cephalosporium*, *Paecilomyces*, *Cladosporium* [15].

Важливим чинником, що впливає на розвиток специфічних мікроорганізмів, може бути використання у технологічному процесі або у процесі експлуатації різноманітних хімічних, органічних та мінеральних домішок, що потрапляють у склад або на поверхню матеріалів.

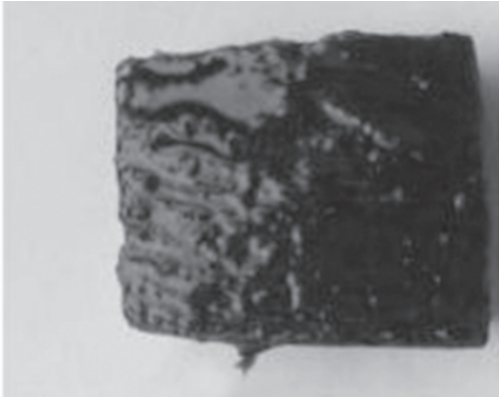
Упродовж багатьох років ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України» проводились дослідження впливу бактерій роду *Pseudomonas* на поверхню бетонних матеріалів. Розроблену біомінеральну суміш наносили на бетонну поверхню, забруднену нафтою. Очищення бетонних поверхонь здійснювали у такий спосіб: на плоскі бетонні пластини, забруднені нафтою, наносили шар попередньо підготовленої біомінеральної композиції завтовшки 0,5–0,8 см. Потім підготовлені зразки бетону переносили у термостат при температурі 37±1°C і вологості 98–100% на 21 добу. Після закінчення експозиції бетонні пластини промивали струменем води для видалення залишків біомінеральної композиції. Якість очищення оцінювали візуально (рисунок).

Встановлено, що наявність нафтопродуктів у поживному середовищі підвищує швидкість біокорозії в 3,5 раза внаслідок активізації життєдіяльності мікроорганізмів в умовах забруднення нафтопродуктами [16].

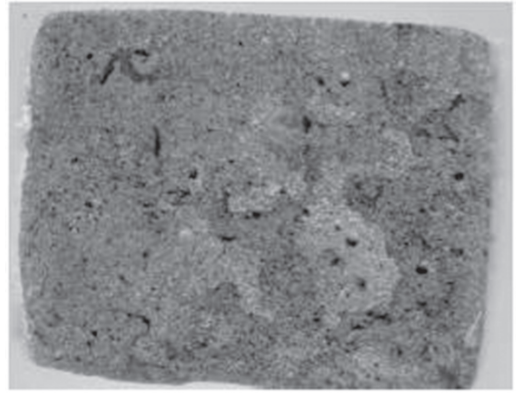
Видовий склад мікробіоценозу на поверхні зруйнованого бетону змінюється залежно від сукупності абіотичних чинників.

Наявність у середовищі міцеліальних грибів визначається рівнем антропогенного навантаження тієї чи іншої території. На бетоні, захищеному карбонатами кальцію, добре розвиваються водорості, але споживання його автотрофами призводить до швидкого руйнування карбонатного бар'єра і відшарування верхньої частини поверхні, що відкриває шлях для заселення глибинних шарів іншими живими організмами. Отже, залежно від дії антропогенних абіотичних чинників, визначальною ланкою в процесі біопшкодження бетонних поверхонь буде той організм, для якого екологічні параметри середовища існування є оптимальними [17, 18].

Для забезпечення придатності промислових об'єктів у межах експлуатації розробляють захисні заходи, оскільки запобігти біодеструкції ефективніше, ніж боротися з нею.



а)



б)

Бетонна пластина: а) забруднена нафтопродуктами; б) після обробки біомінеральною сумішшю

За типом нанесення на матеріал захисні засоби бувають двох видів: захисні покриття, які перешкоджають утворенню біоплівки, та біоцидні домішки. У першому варіанті зменшується адгезивність бактерій з поверхнею матеріалу, що особливо ефективно в умовах високої вологості. З превентивною метою можливо використання композицій амінофосфатів, які також утворюють тонку захисну плівку для посилення антимікробних, гідрофобних властивостей матеріалу, знижуючи тертя контактної поверхні. Так, за використання біоцидів застосовують хімічні сполуки з полівінілу або інших синтетичних полімерів, які у вигляді мікрокапсул додають у фарби та захисні покриття. Також можливо формування трьохшарових капсул у вигляді сполук ароматичного ряду з полізоціаном, желатином та масел аміноформальдегідних груп [19–21].

Нині широко використовуються нанотехнології. Моношар складають наночастинки типу SiO_2 , TiO_2 , ZnO та Fe_2O_3 . Останні, на рівні молекулярних зв'язків, входять до складу органічної частини фарб, утворюючи єдиний галогенний шар. Для антимікробного захисту використовують наночастинки срібла у вигляді солей AgNO_3 , AgClO_3 , Ag_2SO_4 , CH_3COOAg , які змішують з розчинами ізопропанолу, етанолу або етиленгліколю, водою та по-

лімерним стабілізатором типу поліетилен, поліетилметакрилат, поліакриламід. Існує думка, що наночастинки срібла є каталізатором, який формує перекисні сполуки кисню, а також катіони срібла (Ag^+); взаємодіючи з біохімічно активними групами $-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, у клітинах мікроорганізмів пошкоджують мембрани та дезорганізують функції клітин [22–24].

Звичайно, всі захисні покриття бетону досліджують на стійкість як до сірчаної кислоти, яку утворюють тіанобактерії, так і до органічних кислот, продуцентами яких є мікроміцети. Істотним чинником, який провокує корозію бетонів, є не лише «сірчана атака», але й усі процеси, які знижують величину рН. Цінність покриття бетону на основі епоксидних смол визначається стійкістю до зниження рН. Наприклад, додавання цеоліту до складу бетону негативно впливає на ріст бактерії роду *Acidithiobacillus thiooxidans* та на утворення нею біогенних сульфатів.

Модифікація властивостей бетону із застосуванням хімічних і мінеральних добавок – доволі поширений напрям багатьох досліджень [25–28]. Введення хімічних добавок (суперпластифікаторів, гідрофобізаторів, кольматувальних) спрямовано на зниження проникності бетону, що за вимогами стандартів є одним із основних способів зменшення агресивності дії се-

редовища стосовно бетону. Застосування активних (доменного шлаку) і пуцоланових мінеральних добавок (мікрокремнезему, золи-виносу, метакаоліну) надає змогу отримати стійкіші щодо сірчаної кислоти гідратні новоутворення [28–31].

За результатами багаторічних лабораторних та натурних випробувань [29] встановлено, що в значно агресивних середовищах добавки не забезпечують необхідною мірою потрібну довговічність бетону без застосування вторинного захисту.

Розробка заходів зі збільшення стійкості бетонних конструкцій потребує надалі комплексного підходу з урахуванням не лише умов навколишнього природного середовища, а й особливостей функціонування різних мікроорганізмів та продуктів, що утворюються в процесі їх життєдіяльності.

Агресивний вплив агентів біопшкодження спонукає вчених розробляти ефективні методи щодо захисту будівельних конструкцій від їх дії. Ідеальним способом боротьби з біопшкодженнями є усунення мікроорганізмів, що спричиняють або підсилюють відповідні процеси корозії. На сьогоднішні способи захисту від біопшкодження поділяють на три основні групи: фізичні, хімічні, біологічні [32].

1. *Фізичні методи*: використання ультрафіолетового, іонізуючого випромінювання, ультразвуку, лазерних променів тощо.

2. *Біологічні методи*: використання мікроорганізмів, що пригнічують дію шкідливих агентів.

3. *Хімічні методи*: використання біоцидів – штучно синтезованих хімічних речовин.

Для запобігання посиленню дії біологічних агентів у тілі бетону або в будівельному розчині поверхню споруд покривають біоцидними речовинами, що утворюють захисну плівку, просочують біоцидними розчинами або вводять модифікатори біоцидної дії в бетонну суміш, змішуючи з водою. На сьогодні відомо кілька тисяч видів біоцидів. Хімічний метод є одним із найефективніших і найпоширеніших способів захисту від біопшкодження різних

матеріалів. За характером своєї дії токсиканти можна розділити на такі групи:

1. Біоциди, що знищують мікробних збудників біопшкодження.

2. Біостатики, які гальмують зростання мікроорганізмів.

3. Репеленти з «відлякувальним» ефектом щодо біодеструкторів.

Зважаючи на те, що мікробіота, яка уражує матеріали, є доволі різноманітною і часто містить токсиканти з різних груп, найраціональніше застосовувати біоцидні сполуки широкого спектра дії.

Найперспективнішим і екологічно безпечним підходом для розв'язання проблеми біопшкодження є використання препаратів, до складу яких входять бактерії-інгібітори біодеструкторів [32–33].

Нині пропонується низка добавок до бетону та високоміцних бетонів, але більшість із них мають високу собівартість і не застосовуються у промисловості. Бактерицидні добавки для бетону повинні мати тривалий термін зберігання своїх властивостей, тобто не інактивуватися іншими речовинами та продуктами гідратації бетону. Поряд із тим добавки не повинні здійснювати корозійного впливу на бетонну арматурну сталь і погіршувати фізико-механічні властивості бетону.

Встановлено, що біоцидна добавка для бетону на основі жовтого залізо-окисного пігменту (1,5–2,0 мас. %), надцотової кислоти (0,2–0,3), рідкого скла (2–3) та купрум сульфату (0,5–1,0 мас. %) покращує міцність бетону, термостійкість та зменшує проникну здатність [33]. Концентрація 1–2%-ї добавки зберігає міцність зразків бетону в агресивному середовищі на 98–99%.

При додаванні у бетон добавок від 0,5 до 2% глибина проникнення хлоридів знижується з 8,9 до 3,2 мм відповідно, а використання методу ТПД-МС для прогнозування спрямованості та інтенсивності впливу деяких біоцидних добавок на фізико-хімічні параметри бетону підтвердило ефективність застосування розробленої добавки. Добавка проявляє бактерицидні властивості відносно мікробіоти – чисель-

ність грибів зменшується на 98%, що дає підстави для використання її у тваринницьких приміщеннях [33].

Одним із вагомих чинників руйнування мінеральних матеріалів, як-от штукатурки, бетону, природного каменю, цегли, є їх гідрофільність. Замерзання води у порах матеріалу спричиняє його руйнування, а заселення пор грибами і водоростями призводить до біокорозії. Для розв'язання цієї проблеми існує спосіб гідрофобізації. Гідрофобізатори проникають вглиб матеріалу, «вистилають» поверхню його капілярів і у такий спосіб захищають їх від змочування, а гігроскопічний матеріал набуває водовідштовхувальних властивостей. Середовище під гідрофобізованою поверхнею зберігає здатність «дихати», оскільки капіляри тільки трохи звужуються. Мінеральні матеріали після обробки гідрофобізаторами висихають, легшають, збільшують міцність і морозостійкість, у них підвищується теплоізоляційна здатність. До того ж це один із способів боротьби з висолюваннями, тому що солі, які містяться в камені або цеглі, залишаються аморфними і не проступають назовні. Сучасні гідрофобізатори — це матеріали на основі кремній-органічних сполук, як-от: Асолін-ВС, Аквастоп-А, Тіпром ОФ, Тіпром К.

Підвищення надійності і корозійної стійкості будівельних конструкцій в агресивних середовищах може бути досягнуто створенням корозійно стійких будівельних матеріалів нового покоління з використанням сучасних технологій і нових видів арматурних сталей високої надійності, що дасть змогу забезпечити економію металу на 20–40%. Створення якісних і довговічних конструкцій охоплює кілька важливих наукових напрямів:

- дослідження стійкості арматури залізобетону, зчеплення сталі і бетону на нових в'язучих. Розробка заходів із за-

безпечення довговічності залізобетонних конструкцій за одночасного впливу агресивного середовища і навантаження;

- розробка бетонних і залізобетонних конструкцій високої довговічності, корозійної- і стійкості до біологічної корозії, що виготовляються за економічними технологіями з використанням підходів промисловості і сільського господарства. Крім того, необхідно приділяти увагу вивченню процесів внутрішньої корозії бетону на тлі використання місцевих сировинних матеріалів із підвищеним умістом шкідливих домішок;

- розробка і впровадження методів контролю параметрів якості і довговічності будівельної продукції на заводах, що їх виготовляють.

ВИСНОВКИ

Наведені дані засвідчують реальну шкоду та загрозу об'єктам народного господарства від мікробіологічної корозії. Актуальним є використання новітніх технологій для забезпечення якісних характеристик промислових матеріалів упродовж тривалого терміну експлуатації. Наночастинки з наномікробними гідрофобними властивостями запобігають поляризації поверхні матеріалу, знижують тертя, що особливо важливо для контактуючих поверхонь, та посилюють видалення забруднення з них. Економічні переваги стійкого довговічного бетону лежать в основі раціонального використання ресурсів.

Для визначення та розробки оптимальних засобів захисту бетонних конструкцій від біокорозії необхідно використовувати комплексний підхід на основі врахування природних процесів у середовищі мікроорганізмів в умовах сучасного техногенного навантаження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Микроскопические грибы во внешней среде города / О.Е. Марфенина, А.Б. Кулько, А.Е. Иванова, М.В. Соконов // Микология и фитопатология. — 2002. — Т. 36, Вып. 4. — С. 22–32.
2. Videla H.A. Microbiologically influenced corrosion: looking to the future / H.A. Videla, L.K. Herrera // International Microbiol. — 2005. — Vol. 8(3). — P. 169–180.

3. *Pilyashenko-Novokhatny A.I.* Microbial metabolites as indicators of corrosion activity of soils / A.I. Pilyashenko-Novokhatny, A.M. Rozhanskaya, I.A. Kozlova // Мікробіологічний журнал. — 1997. — Т. 59, № 5. — С. 62–66.
4. Влияние техногенных факторов на микробное сообщество почв / Л.М. Пуриш, А.М. Рожанская, А.И. Пиляшенко-Новохатный, И.А. Козлова // Мікробіологічний журнал. — 1996. — Т. 58, № 3. — С. 17–24.
5. Методическое руководство для микробиологических исследований. Бактериальная коррозия бетона и биовыщелачивание отходов в горнодобывающей промышленности / Т.Н. Абашина, М.Б. Вайнштейн, С.А. Хаустов. — Пуццино, 2015. — 30 с.
6. *Beech I.B.* Microbe-surface interactions in biofouling and biocorrosion processes / I.B. Beech, J.A. Sunner, K. Hiraoka // International Microbiol. — 2005. — Vol. 8(3). — P. 157–168.
7. *Gibbon D.L.* Detection and identification of microbially influenced corrosion (MIC) in steels / D.L. Gibbon, M. Zamanzadeh // Corrosion: NACE International (New Orleans, 16–20 March 2008). — New Orleans, Louisiana, 2008. — P. 14.
8. *Herrera L.K.* Surface analysis and materials characterization for the study of biodeterioration and weathering effects on cultural property / L.K. Herrera, H.A. Videla // Int. Biodeterior. Biodegrad. — 2009. — Vol. 63. — P. 813–822.
9. Effect of ethylene-diaminetetraacetic disodium dihydrate and sodium nitrite admixtures on steel-rebar corrosion in concrete / J.O. Okeniyi, O.M. Omoniyi, S.O. Okpala et al. // European Journal of Environmental and Civil Engineering. — 2013. — Vol. 17(5). — P. 398–416.
10. *Василенко М.И.* Влияние экологических факторов среды на состояние поверхностей городских зданий / М.И. Василенко // Инновационные пути решения актуальных проблем базовых отраслей, экологии, энерго- и ресурсосбережения: Сб. статей XXI Междунар. научно-практ. конф. «Казантип: ЭКО». — Щолкино, 2013. — С. 337–339.
11. Коррозия строительных материалов: монография / В.Н. Вернигорова, Е.В. Королев, А.И. Еремкин, Ю.А. Соколова. — М., 2007. — 176 с.
12. Исследование химической стойкости цементных бетонов с учетом сульфатной коррозии / В.П. Селяев, Л.М. Ошкина, П.В. Селяев, Е.В. Сорокин // Региональная архитектура и строительство. — 2012. — № 1. — С. 4–11.
13. Aniline effect on concrete steel rebar degradation in saline and sulfate media / O.A. Omotosho, C.A. Loto, O.O. Ajayi, J.O. Okeniyi // Agricultural Engineering International: CIGR Journal. — 2011. — Vol. 13(2). — P. 1–17.
14. *Rakanta E.* Corrosion protection of steel with DMEA-based organic inhibitor / E. Rakanta, T. Zafeiropoulou, G. Batis // Construction and Building Materials. — 2013. — Vol. 44. — P. 507–513.
15. Обзор методов исследования грибов, повреждающих памятники архитектуры и искусства / Д.Ю. Власов, М.С. Зеленская, А.А. Горбушина, Е.В. Богомолова // Актуальные проблемы микробиологии: Сб. трудов БиНИИ СПбГУ. 2001. — № 47. — С. 88–100.
16. Разработка биоминеральной композиции для очистки твердых поверхностей от нефтепродуктов [Электронный ресурс] / В.В. Шкапенко, В.М. Кадощников, Е.Г. Мусич // Режим доступа: <http://5bio5.blogspot.com/2018/02/book.html>
17. *Berdoulay M.* Genetic characterization of microbial communities living at the surface of building stones / M. Berdoulay, J.C. Salvado // Lett. Appl. Microbiol. — 2009. — Vol. 49. — P. 311–316.
18. *Василенко М.И.* Микробиологические особенности процесса повреждения бетонных поверхностей / М.И. Василенко, Е.Н. Гончарова // Фундаментальные исследования. — 2013. — № 4(4). — С. 886–891.
19. *Shi X.* Recent progress in the research on microbially influenced corrosion; a bird's eye view through the engineering lens / X. Shi, N. Xie, J. Gong // Recent Patents on Corrosion Science. — 2011. — Vol. 1. — P. 118–131.
20. *Vainshtein M.* Bioleaching of metals as eco-friendly technology / M. Vainshtein; G. Cao, R. Orru (Eds.) // Current Environmental Issues and Challenges. — Springer, 2014. — P. 197–206.
21. Resistance of mineral admixture concrete to acid attack / S. Goyal, M. Kumar, D. S. Sidhu, B. Bhattacharjee // Journal of Advanced Concrete Technology. — 2009. — Vol. 7(2). — P. 273–283.
22. Biogenic sulfuric acid attack on different types of commercially produced concrete sewer pipes / M.G.D. Gutierrez-Padilla, A. Bielefeldt, S. Ovtchinnikov et al. // Cement and Concrete Research. — 2010. — Vol. 40. — P. 293–301.
23. Toward an accelerated biodegradation test to understand the behavior of Portland and calcium aluminate cementitious materials in sewer networks / J. Herisson, E.D. van Huilebusch, M. Moletta-Denat et al. // International Biodeterioration & Biodegradation. — 2013. — Vol. 84. — P. 236–243.
24. Microbial diversity and community structure on corroding concretes / H. Li, D. Liu, B. Lian et al. // Geomicrobiology Journal. — 2012. — Vol. 29(5). — P. 450–458.
25. *Wu L.* The Sustainability of Concrete in Sewer Tunnel – A Narrative Review of Acid Corrosion in the City of Edmonton, Canada / L. Wu, C. Hu, W. Liu // Sustainability. — 2018. — Vol. 10(2). — P. 517.
26. *Штарк И.* Долговечность бетона / И. Штарк, Б. Вихт; под ред. П. Кривенко. — К.: Оранта, 2004. — 301 с.
27. Sulphuric acid resistant ecofriendly concrete from geopolymerisation of blast furnaceslag / N.P. Rajamane, M.C. Nataraja, N. Lakshmanan et al. // Indian Journal of Engineering & Materials Sciences. — 2012. — Vol. 19. — P. 357–367.
28. Effect of mineral admixtures on resistance to sulfuric acid solution of mortars with quaternary binders / Z. Makhlofua, M. Bederinaa, M. Bouhichaa, E. Kadrib // Eighth International Conference on Material Sciences. Physics Procedia. — 2014. — Vol. 55. — P. 329–335.

29. Розенталь Н.К. Коррозия и защита бетонных и железобетонных конструкций сооружений очистки сточных вод / Н.К. Розенталь // Бетон и железобетон. — 2011. — № 2. — С. 78–85.
30. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against sulfuric acid attack / A.A. Ramezaniapour, A. Zolfagharnasab, F.B. Zadeh, S.H. Estahbanati // High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet: Proceedings of the 2017 fib Symposium. — 2017. — P. 2290–2298.
31. Videla H.A. Manual of Biocorrosion / H.A. Videla. — Lewis Publishers CRC Press. USA, 1996. — 273 p.
32. Пономаренко А.В. Биологическое повреждение бетона и железобетона в процессе эксплуатации объектов / А.В. Пономаренко, К.В. Шенцова // Студенческий форум. — 2017. — Вып. 4(4). — С. 84–86.
33. Improvement of functional performance of concrete in livestock buildings through the use of complex admixtures / O. Shkromada, A. Paliy, O. Nechyporenko et al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2019. — Vol. 1(7(97)). — P. 41–49.

REFERENCES

1. Marfenina, O.E., Kulko, A.B., Ivanova, A.E., Sogonov, M.V. (2002). Mikroskopicheskie griby vo vnesheinei srede goroda [Microscopic mushrooms in the external environment of the city]. *Mikologiya i fitopatologiya – Mycology and phytopathology*, 36(4), 22–32 [in Russian].
2. Videla, H.A., Herrera, L.K. (2005). Microbiologically influenced corrosion: looking to the future. *Int Microbiol*, 8(3), 169–180 [in English].
3. Pilyashenko-Novokhatny, A.I., Rozhanskaya, A.M., Kozlova, I.A. (1997). Microbial metabolites as indicators of corrosion activity of soils. *Mikrobiologichnyi zhurnal – Microbiological journal*, 59(5), 62–66 [in English].
4. Purish, L.M., Rozhanskaya, A.M., Pilyashenko-Novokhatny, A.I., Kozlova, I.A. (1996). Vliyaniye tkhnogennykh faktorov na mikrobnnoye soobschestvo gruntov [Influence of technogenic factors on the microbial soil community]. *Mikrobiologichnyi zhurnal – Microbiological journal*, 58(3), 17–24 [in Russian].
5. Abashina, T.N., Weinstein, M.B., Khaustov, S.A. (2015). Metodicheskoye rukovodstvo dlya mikrobiologicheskikh issledovaniy. Bakterialnaya korroziya betona i biovyshchelachivaniye otkhodov v gomorudnoy promyshlennosti [A methodological guide for microbiological research. Bacterial corrosion of concrete and bioleaching of waste in the mining industry]. Pushchino [in Russian].
6. Beech, I.B., Sunner, J.A., Hiraoka, K. (2005). Microbe-surface interactions in biofouling and biocorrosion processes. *Int. Microbiol*, 8(3), 157–168 [in English].
7. Gibbon, D.L., Zamanzadeh, M. (2008). Detection and identification of microbially influenced corrosion (MIC) in steels. *Corrosion: NACE International*. 16–20 March 2008. (p.14). New Orleans, Louisiana [in English].
8. Herrera, L.K., Videla, H.A. (2009). Surface analysis and materials characterization for the study of biodeterioration and weathering effects on cultural property. *Int. Biodeterior. Biodegrad*, 63, 813–822 [in English].
9. Okeniyi, J.O., Omoniyi, O.M., Okpala, S.O., Loto, C.A., Popoola, A.P. (2013). Effect of ethylene-diaminetetraacetic disodium dihydrate and sodium nitrite admixtures on steel-rebar corrosion in concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 17(5), 398–416 [in English].
10. Vasilenko, M.I. (2013). Vliyaniye ekologicheskikh faktorov sredy na sostoyaniye poverkhnosti gorodskikh zdaniy [Influence of environmental environmental factors on the state of the surface of urban buildings]. Innovative ways to solve pressing problems of basic industries, ecology, energy and resource conservation '13: XXI Mezhdunar. nauchno-prakt. konf.: Sat. Articles – XXI Int. scientific and practical. conf. (pp. 337–339). Shcholkino [in Russian].
11. Vernigorova, V.N., Korolev, E.V., Eremkin, A.I., Sokolova, Yu.A. (2007). Korroziya stroitelnykh materialov: monografiya [Corrosion of building materials: monograph]. Moskva [in Russian].
12. Selyaev, V.P., Oshkina, L.M., Selyaev, P.V., Sorokin, E.V. (2012). Issledovaniye khimicheskoy stoykosti tsementnykh betonov s uchedom sulfatnoy korrozii [Study of the chemical resistance of cement concrete, taking into account sulfate corrosion]. *Regionalnaya arkhitektura i stroitelstvo – Regional architecture and construction*. 1, 4–11 [in Russian].
13. Omotosho, O.A., Loto, C.A., Ajayi, O.O., Okeniyi, J.O. (2011). Aniline effect on concrete steel rebar degradation in saline and sulfate media. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 13(2), 1–17 [in English].
14. Rakanta, E., Zafeiropoulou, T., Batis, G. (2013). Corrosion protection of steel with DMEA-based organic inhibitor. *Construction and Building Materials*. 44, 507–513 [in English].
15. Vlasov, D.Yu., Zelenskaya, M.S., Gorbushina, A.A., Bogomolova, E.V. (2001). Obzor metodov issledovaniya gribov, povrezhdayushchikh pamyatniki arkhitektury i iskusstva [A review of research methods for fungi damaging monuments of architecture and art]. *Aktualnyye problemy mikologii: Sb. trudov BiNII SPbGU – Actual problems of mycology: Sat. Proceedings of the Scientific Research Institute of St. Petersburg State University*, 47, 88–100 [in Russian].
16. Shkapenko, V., Kadoshnikov, V.M., Musich, E.G., Kuraeva, I.V., Voityuk, Yu.Yu., Krasyuk, O.P. (2018). Razrabotka biomineralnoy kompozitsii dlya oчитki tverdykh poverkhnostey ot nefteproduktov [De-

- velopment of a biomineral composition for cleaning solid surfaces from petroleum products]. *5bio5.blogspot.com*. Retrieved from <http://5bio5.blogspot.com/2018/02/book.html> [in Russian].
17. Berdoulay, M., Salvado, J.C. (2009). Genetic characterization of microbial communities living at the surface of building stones. *Lett Appl Microbiol*, 49, 311–316 [in English].
 18. Vasilenko, M.I., Goncharova, E.N. (2013). Mikrobiologicheskiye osobennosti protsessy povrezhdeniya betonnykh poverkhnostey [Microbiological features of the damage to concrete surfaces]. *Fundamentalnyye issledovaniya – Fundamental research*, 4(4), 886–891 [in Russian].
 19. Shi, X., Xie, N., Gong, J. (2011). Recent progress in the research on microbially influenced corrosion; a bird's eye view through the engineering lens. *Recent Patents on Corrosion Science*, 1, 118–131 [in English].
 20. Vainshtein, M. (2014). *Bioleaching of metals as eco-friendly technology*. In: *Current Environmental Issues and Challenges*. G.Cao, R. Orru (Eds.). Springer [in English].
 21. Goyal, S., Kumar, M., Sidhu, D.S., Bhattacharjee, B. (2009). Resistance of Mineral Admixture Concrete to Acid Attack. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 7(2), 273–283 [in English].
 22. Gutierrez-Padilla, M.G.D., Bielefeldt, A., Ovtchinikov, S., Hernandez, M., Silverstein, J. (2010). Biogenic sulfuric acid attack on different types of commercially produced concrete sewer pipes. *Cement and Concrete Research*, 40, 293–301 [in English].
 23. Herisson, J., Van Huilebusch, E.D., Moletta-Denat, M., Taquet, P. (2013). Chaussadent T. Toward an accelerated biodegradation test to understand the behavior of Portland and calcium aluminate cementitious materials in sewer networks. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 84, 236–243 [in English].
 24. Li, H., Liu, D., Lian, B., Sheng, Y., Dong, H. (2012). Microbial diversity and community structure on corroding concretes. *Geomicrobiology Journal*, 29(5), 450–458 [in English].
 25. Wu, L., Hu, C., Liu, W. (2018). The Sustainability of Concrete in Sewer Tunnel-A Narrative Review of Acid Corrosion in the City of Edmonton, Canada. *Sustainability*, 10(2), 517 [in English].
 26. Shtark, I., Vikht, B. (2004). *Dolgovechnost betona [Concrete durability]*. Kiev: Oranta [in Russian].
 27. Rajamane, N.P., Nataraja, M.C., Lakshmanan, N., Dattatreya, J.K., Sabitha, D. (2012). Sulphuric acid resistant ecofriendly concrete from geopolymerisation of blast furnaceslag. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 19, 357–367 [in English].
 28. Makhlof, Z., Bederina, M., Bouhichaa, M., Kadrib, E. (2014). Effect of mineral admixtures on resistance to sulfuric acid solution of mortars with quaternary binders. *Eighth International Conference on Material Sciences. Physics Procedia*, 55, 329–335 [in English].
 29. Rosenthal, N.K. (2011). Korroziya i zashchita betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktivnykh sooruzheniy ochistki stochnykh vod [Corrosion and protection of concrete and reinforced concrete structures of wastewater treatment plants]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 2, 78–85 [in Russian].
 30. Ramezaniapour, A.A., Zolfagharnasab, A., Zadeh, F.B., Estahbanati, S.H. (2017). Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against sulfuric acid attack. *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet – Proceedings of the 2017 fib Symposium* (pp. 2290–2298). N.p. [in English].
 31. Videla, H.A. (1996). *Manual of Biocorrosion*. Lewis Publishers CRC Press. USA [in English].
 32. Ponomarenko, A.V., Shentsova, K.V. (2017). Biologicheskoye povrezhdeniye betona i zhelezobetona v protsesse ekspluatatsii ob'yektov [Biological damage to concrete and reinforced concrete during the operation of facilities]. *Studencheskiy forum – Student Forum*, 4(4), 84–86 [in Russian].
 33. Shkromada, O., Paliy, A., Nechyporenko, O., Naumenko, O., Nechyporenko, V., Burlaka, O., Reshetnichenko, A., Tsereniuk, O., Shvets, O., Paliy A. (2019). Improvement of functional performance of concrete in livestock buildings through the use of complex admixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7(97)), 41–49 [in English].

Стаття надійшла до редакції журналу 05.10.2019