

УДК 624.012.45:620.193

БІОГЕННА СІРЧАНОКИСЛОТНА КОРОЗІЯ БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ КАНАЛІЗАЦІЙНИХ МЕРЕЖ: АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

Аспіранти М. С. Гудименко, Юй Вей, д-р техн. наук О. С. Борзяк

BIOGENIC SULFURIC ACID CORROSION OF CONCRETE STRUCTURES IN SEWER NETWORKS: A COMPREHENSIVE DIAGNOSTIC ALGORITHM FOR TECHNICAL CONDITION ASSESSMENT

Postgraduate student M. Hudymenko, postgraduate student Yu Wei,
Dr. Sc. (Tech.) O. Borziak

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.373391>



Анотація. Розглянуто проблему біогенної сірчанокислотної корозії бетонних конструкцій каналізаційних мереж, яка є однією з основних причин передчасного руйнування колекторів, камер та інших споруд систем водовідведення. Проаналізовано механізм розвитку корозійного процесу та визначено найбільш інформативні діагностичні показники для оцінювання ступеня деградації бетону. На основі аналізу літературних джерел і практичного досвіду розроблено алгоритм комплексної діагностики технічного стану бетонних конструкцій каналізаційних мереж. Алгоритм передбачає послідовне виконання візуального обстеження, неруйнівного контролю, відбору проб, фізико-хімічних і фізико-механічних досліджень із подальшим інтегральним оцінюванням отриманих результатів. Для перевірки працездатності запропонованого підходу виконано його апробацію на експлуатованій залізобетонній споруді каналізаційної мережі з ознаками біогенної корозії. Встановлено, що для досліджуваної конструкції найбільш інформативними показниками стали результати визначення рН і мікроструктурного аналізу. Показано, що застосування повного комплексу діагностичних процедур дає змогу адаптувати алгоритм для споруд із різним ступенем деградації та формувати обґрунтовані рекомендації щодо їхньої подальшої експлуатації, ремонту або заміни.

Ключові слова: біогенна корозія, сірчанокислотна корозія, каналізаційні мережі, бетон, діагностика, технічний стан, рН.

Abstract. Biogenic sulfuric acid corrosion is one of the major causes of premature deterioration of concrete and reinforced concrete structures in sewer networks. The paper analyzes the mechanisms of biogenic sulfuric acid corrosion and identifies the most informative diagnostic indicators for assessing the degradation degree of concrete structures exposed to this type of attack. Particular attention is paid to visual damage characteristics, surface strength indicators, moisture content, pH measurements, and microstructural and elemental analyses. It is shown that no single parameter can provide a reliable assessment of the technical condition of a structure affected by biogenic corrosion. Therefore, a comprehensive approach combining several complementary diagnostic methods is required.

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Гудименко М. С., Юй Вей, Борзяк О. С., 2026.

Based on an analysis of the corrosion mechanisms and a review of current diagnostic approaches, a comprehensive algorithm for technical condition assessment of concrete structures in sewer networks is proposed. The algorithm integrates field inspections, non-destructive testing methods, sampling procedures, laboratory physicochemical investigations, and physical-mechanical evaluations. A key feature of the algorithm is its flexibility, allowing the selection of the most informative diagnostic parameters depending on the specific condition of the investigated structure.

The applicability of the proposed algorithm was verified through a case study involving an operating reinforced concrete sewer structure exhibiting typical signs of biogenic sulfuric acid corrosion. The obtained results demonstrated that pH measurements and microstructural investigations provided the most representative information for the examined structure. Low pH values in the surface layer indicated a complete loss of the protective alkaline properties of the cement matrix, while differences between surface and internal pH values made it possible to estimate the depth of corrosion propagation. Scanning electron microscopy combined with energy-dispersive spectroscopy confirmed the presence of corrosion products and substantial degradation of the cementitious matrix.

The study demonstrates that the proposed diagnostic algorithm can be effectively applied to concrete sewer structures at different stages of deterioration. The results may be used to support maintenance planning, rehabilitation strategies, and decision-making concerning continued operation, repair, strengthening, or replacement of damaged structures.

Keywords: biogenic corrosion, sulfuric acid corrosion, sewer networks, concrete, diagnostics, technical condition, pH.

Вступ. Підземні каналізаційні мережі належать до інженерних об'єктів, технічний стан яких роками залишається без спостереження, а перші ознаки руйнування виявляють здебільшого вже, коли пошкодження набули непоправного характеру. Бетонні та залізобетонні колектори, оглядові та перепадні камери, вузли з'єднання потоків працюють у середовищі, яке поєднує одразу кілька агресивних чинників: безпосередній контакт зі стічними водами, постійну високу вологість, обмежений повітрообмін і, що найважливіше, насичений сірководнем простір каналізації. Саме така сукупність чинників створює передумови для розвитку руйнування, який у літературі називають мікробіологічно ініційованою, або біогенною, корозією бетону.

Особливість цього явища полягає в тому, що руйнування відбувається не через прямий хімічний контакт із речовиною зі стоків, а внаслідок життєдіяльності бактерій. Сірководень, що виділяється зі стоків за анаеробних умов, окиснюють сіркоокиснювальні мікроорганізми до

сірчаної кислоти безпосередньо на стінах споруди. Речовина повільно розчиняє цементний камінь, перетворюючи матеріал стін на пухку масу, що складається переважно з гіпсу і вторинних продуктів. Конструкція, що розрахована на сторічну експлуатацію, може втратити несучу здатність уже через два-три десятиліття, а за умови інтенсивного навантаження це відбудеться швидше.

Втрата товщини стінок колектору призводить до просідання дорожнього покриття над трасою мережі, аварійних проривів і неконтрольованого витoku стічних вод у ґрунт. Вузли магістральних колекторів при цьому особливо вразливі в місцях, де сходяться потоки з різних ділянок, посилюється турбулентність. Зростає виділення сірководню, який призводить до руйнувань і виходу з ладу значної частини системи водовідведення. Вартість заміни таких споруд є високою, а виконання робіт ускладнено глибиною закладання та неможливістю тривалого припинення транспортування стоків.

Розв'язання проблеми посилено тим, що існуючі методи захисту не завжди дають очікуваний результат. Захисні покриття, полімерні оболонки здатні подовжити термін служби лише за умови їх застосування на ранній стадії, коли корозійний фронт ще не досяг арматури. На пізніх етапах, коли цементний камінь уже зруйновано до значної глибини, нанесення покриттів на ослаблену основу не відновлює несучої здатності, а лише маскує стан конструкції. Це означає, що основним завданням стає не стільки сам захист, скільки своєчасна і достовірна діагностика, яка здатна визначити глибину ураження споруди до того, як руйнування стане катастрофічним.

Попри тривалу історію вивчення біогенної корозії, у практиці бракує усталеної методики, яка б поєднувала польове оцінювання міцності з лабораторним аналізом хімічного та мінерального складу зруйнованого шару. Здебільшого технічний стан камер і колекторів оцінюють візуально або за окремими показниками, що не дає змогу однозначно встановити причину і глибину деградації. Саме тому актуальним є розроблення методичного підходу, який поєднує польові та лабораторні методи досліджень для обґрунтованого оцінювання технічного стану бетонних конструкцій каналізаційних мереж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Біогенне руйнування бетонних каналізаційних споруд відоме давно, але за останнє десятиліття його дослідження значно поглиблені завдяки сучасним фізико-хімічним методам аналізу. Зокрема, сучасні методи дали змогу детальніше вивчити біорізноманіття корозійних угруповань. Дослідження Х. Лі зі співавторами [1] допомогло розширити класичне уявлення про роль сіркоокиснювальних бактерій і пояснило, чому інтенсивність руйнування різко зростає лише після проходження певного порога лужності. Процес руйнування

залежить від розвитку та поступової зміни колонії ацидофільних мікроорганізмів у корозійному середовищі колектора, супроводжених переходом домінування до гіперацидофільних видів роду *Acidithiobacillus*, здатних існувати за вкрай низьких значень рН.

У роботах [1-3], присвячених механізмам і явищам біологічної корозії бетону в каналізаційних спорудах, процес руйнування описано як послідовність кількох фаз. За даними М. Ву зі співавторами [2], спочатку відбувається абіотична карбонізація, яка знижує початковий водневий показник поверхні приблизно з 13 до 9. Потім поверхню заселяють нейтрофільні сіркоокиснювальні мікроорганізми, що знижують реакцію середовища до 4–5. Після цього домінування переходить до ацидофільних видів, відповідальних за найінтенсивнішу фазу деградації. Така модель важлива тим, що пояснює тривалий «латентний» період відносної стійкості свіжого бетону і подальший лавиноподібний характер руйнування.

В огляді С. Праманіка зі співавторами [3] систематизовано механізми та чинники впливу, зокрема розглянуто концентрацію сірководню в надводному просторі, температуру, вологість, склад цементу і водоцементне відношення. Автори зазначають, що, попри тривалу історію вивчення, предмет залишається дискусійним. Кількісне прогнозування швидкості руйнування досі не має надійної основи. У роботі також приділено увагу різниці між лабораторними та польовими даними, зазначено, що прискорені тести часто завищують швидкість деградації, тоді як у реальних колекторах процес іде нерівномірно та безпосередньо залежить від наявних умов. Цю розбіжність підтверджує лабораторний метод дослідження біодеградації бетону, у якому показано, що результати прискорених випробувань у розчинах сірчаної кислоти лише умовно відтворюють натурну картину та не завжди

корелюють з результатами, що спостерігають у реальних спорудах.

Окрему лінію досліджень становлять роботи, присвячені кількісному оцінюванню швидкості руйнування та ролі складу бетону. Дослідження фазових перетворень різних в'язучих в умовах прискореного сірчано-кислотного впливу із застосуванням комплексу методів мікроструктурного аналізу (СЕМ, рентгенофазовий аналіз) показало, що ступінь деградації визначений насамперед вмістом кальцієвих гідратних фаз. Характерними індикаторами біокорозії є гіпс і еtringіт, утворення яких супроводжено збільшенням об'єму, що призводить до внутрішніх напружень. У матеріалах із високим вмістом портландиту і гідросилікатів кальцію спостерігають більшу інтенсивність утворення гіпсу і втрати маси, тоді як геополімерні композити мають суттєво вищу стійкість [4].

Польове обстеження каналізаційного колектора [5] показало, що над рівнем води рН порового розчину знижується до критично низьких значень, а в зоні змінного зволоження швидкість руйнування в кілька разів вища, ніж у склепінні. У глибших шарах разом із гіпсом і еtringітом виявлено карбонат кальцію, що вказує на супутню карбонізацію. Показово, що навіть за відсутності видимих ознак руйнування фізико-хімічні методи аналізу фіксують мінералогічні перетворення в цементному камені. Зокрема, виявлено утворення гіпсу, еtringіту і елементарної сірки. Ці зміни відбуваються вже на ранніх стадіях впливу сірководню навіть за його низьких концентрацій [6]. Це означає, що видимий стан поверхні може суттєво відставати від фактичного ступеня внутрішньої деградації, а отже, надійна діагностика неможлива без інструментального аналізу складу матеріалу.

Сучасні дослідження методів пом'якшення біокорозії містять суперечливі результати. Традиційні підходи ґрунтовані на застосуванні бактерицидів і поверхневих покриттів, але мають обмежену

довговічність і певні екологічні ризики. Для пригнічення мікробної активності в бетонну суміш вводять нітрит кальцію, який за низького рН перетворюється на азотисту кислоту з антимікробною дією. Це забезпечує в польових умовах реального колектора зменшення втрати матеріалу приблизно на третину порівняно з контрольними зразками [7]. Ще один метод захисту – мінеральні захисні покриття. Дослідження покриття на основі гідроксиду магнію в умовах прискореного кислотного впливу показали його здатність нейтралізувати кислоту, що уповільнює руйнування основи [8]. Більшість таких рішень орієнтована на захист нових конструкцій або на ранні стадії ураження. Досліджень, присвячених відновленню споруд, що зазнали впливу біокорозії, у літературі значно менше.

Як показують дослідження, мікробіологічна корозія є складним і просторово неоднорідним процесом. Найчастіше методика діагностики технічного стану споруд, що зазнають впливу такого виду корозії, є неузгодженою та не завжди ефективною. Достовірний висновок про стан конструкції можна зробити лише на основі комплексу показників. До них належать візуальний огляд, вимірювання поверхневого рН, оцінювання втрати маси та міцності, а також аналіз глибини нейтралізації [9]. Жоден окремо взятий параметр не є самодостатнім, і саме комплексний підхід дає змогу відрізнити поверхневе ураження від глибокої структурної деградації. Отже, розроблення алгоритму комплексної діагностики технічного стану експлуатованих споруд є актуальною темою.

Мета та завдання дослідження

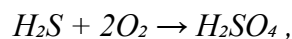
Мета дослідження – розроблення алгоритму комплексної діагностики технічного стану бетонних конструкцій каналізаційних мереж, уражених біогенною сірчано-кислотою корозією, на основі поєднання польових неруйнівних і лабораторних фізико-хімічних методів досліджень.

Завдання дослідження – аналіз особливостей розвитку біогенної сірчаноокислотної корозії бетонних конструкцій каналізаційних мереж; визначення діагностичних показників, найбільш інформативних для оцінювання ступеня деградації бетону в умовах біогенної корозії; розроблення алгоритму комплексного обстеження, який поєднує неруйнівні та лабораторні методи досліджень; апробація запропонованого алгоритму на прикладі експлуатованої каналізаційної споруди з ознаками біогенного корозійного ураження; розроблення рекомендацій щодо практичного застосування алгоритму під час обстеження каналізаційних споруд.

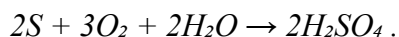
Основна частина дослідження. Основною причиною корозійного руйнування каналізаційних споруд є біокорозія, в основі якої лежить окиснення сполук сірки до сірчаної кислоти тіоновими (сірковими) бактеріями [11, 12]. Механізм цього процесу можна простежити покроково [3]. Непошкоджений бетон має сильно лужне середовище ($\text{pH} > 12$), несприятливе для розвитку корозієтвірних бактерій. Проте внаслідок карбонізації лужність поступово знижується до $\text{pH} < 9$, і за таких умов поверхню послідовно

заселяють бактерії видів *Thiobacillus novellus*, *Thiobacillus neapolitanus* і *Thiobacillus thioararus*, життєдіяльність яких знижує реакцію середовища до $\text{pH} < 5$.

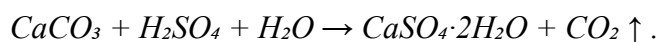
Сірковмісні сполуки в системі представлені насамперед леткими формами - сірководнем H_2S та органічними полісульфідами. Вони утворюються в анаеробних зонах сульфатвідновлювальними бактеріями родів *Desulfotomaculum* і *Desulfovibrio* із сульфатів, наявних у стоках. Виділяючись в атмосферу колектора, ці сполуки осідають на вологих бетонних поверхнях вище рівня води, де аеробні тіобактерії біохімічно окиснюють їх до сірчаної кислоти:



а також через проміжну стадію елементарної сірки за узагальненою реакцією



Утворена біогенна сірчана кислота реагує з компонентами цементного каменю, спричиняючи його руйнування з утворенням гіпсу і еtringіту, наприклад



Кінцевим механізмом руйнування є кислотна та сольова корозія сульфатного типу, а характерними її продуктами - гіпс і еtringіт, утворення яких супроводжує значне збільшення об'єму та виникнення внутрішніх напружень у структурі матеріалу. Узагальнену послідовність перетворень, що зумовлюють руйнування, наведено на рис. 1.

Отже, біогенна сірчаноокислотна корозія є багатостадійним процесом, що супроводжує зміна кислотності поверхні бетону, накопичення продуктів корозії, деструкція цементного каменю та поступове

зниження міцності матеріалу. Вказані зміни можуть бути використані як діагностичні ознаки для оцінювання технічного стану каналізаційних споруд.

Аналіз механізму біогенної сірчаноокислотної корозії показує, що процес деградації бетону супроводжує комплекс взаємопов'язаних фізичних, хімічних і структурних змін. Тому достовірне оцінювання технічного стану конструкцій не може бути ґрунтоване на одному показнику, а потребує комплексного використання декількох діагностичних параметрів [2, 3, 9].

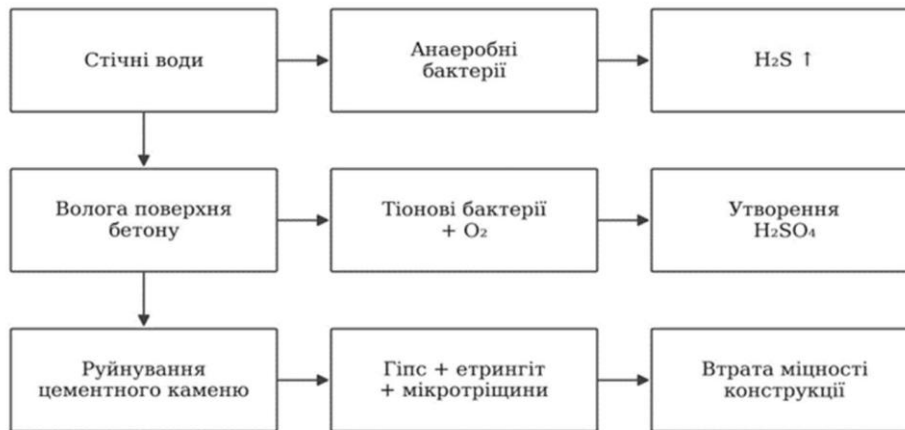


Рис. 1. Послідовність стадій біогенної сірчаноокислотної корозії бетону каналізаційної споруди

На початковому етапі обстеження обов'язковою є візуальне оцінювання стану поверхні конструкції. Ознаками біогенної корозії є наявність пухких відкладень білого або сіруватого кольору, розм'якшення поверхневого шару бетону, локальні вибоїни, оголення арматури та наявність продуктів корозії металу. Візуальне обстеження допомагає встановити найбільш уражені ділянки та визначити місця відбору проб для подальших досліджень.

Одним із найбільш інформативних показників корозії є водневий показник рН. Для непошкодженого бетону характерні значення рН 12,5-13, тоді як розвиток сіркоокиснювальних бактерій супроводжує поступове зниження лужності [1, 2, 11, 12]. В умовах інтенсивної біокорозії поверхневі шари можуть мати значення рН менше 4, що свідчить про повну втрату захисних властивостей цементного каменю і активний перебіг корозійних процесів. Висока вологість створює сприятливі умови для розвитку мікроорганізмів і перенесення агресивних речовин у поровому просторі бетону. Крім того, надмірна вологість часто супроводжує втрату щільності цементного каменю та підвищення його пористості внаслідок корозійної деградації [3, 9].

Для оцінювання залишкової несучої здатності конструкції доцільно використовувати показники міцності бетону, отримані неруйнівними методами

контролю. При цьому результати неруйнівних випробувань потрібно розглядати спільно з даними фізико-хімічних досліджень, оскільки локальні поверхневі пошкодження можуть впливати на точність вимірювань [9]. Окрему групу інформативних показників становлять фізико-механічні характеристики бетону. На відміну від поверхневих неруйнівних випробувань, дослідження кернів дає змогу оцінити стан матеріалу за товщиною конструкції та встановити вплив корозійних процесів на його залишкову несучу здатність. До найбільш показових параметрів належать міцність на стиск, густина і характер руйнування зразків під навантаженням. Зниження густини та міцності свідчить про втрату структурної цілісності цементного каменю, зростання пористості та накопичення продуктів корозії. У поєднанні з результатами фізико-хімічного аналізу ці показники дають змогу оцінити не лише наявність корозійного процесу, але і ступінь його впливу на експлуатаційну придатність конструкції.

Відомо [13, 14], що характерними продуктами корозії сульфатного типу є гіпс і еtringіт. Саме наявність цих фаз і відсутність продуктів гідратації цементу є надійним діагностичним маркером біогенного походження руйнування. Тому найбільш достовірну інформацію про ступінь деградації матеріалу дають

мікроструктурні та мінералогічні дослідження. Встановлення співвідношення між вихідними компонентами цементного каменю та продуктами корозії допомагає кількісно оцінити ступінь пошкодження бетону. Додаткове використання енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії дасть змогу оцінити зміну елементного складу і накопичення сірки як одного з основних індикаторів сірчаноокислотної корозії.

Отже, для оцінювання ступеня деградації бетону внаслідок біогенної сірчаноокислотної корозії доцільно використовувати сукупність показників, до яких належать характер візуальних пошкоджень, поверхнева міцність бетону, вологість матеріалу, величина рН, а також мікроструктурні та мінералогічні

характеристики. Комплексне використання зазначених параметрів забезпечує об'єктивне оцінювання технічного стану конструкції та може бути покладене в основу алгоритму її діагностики.

На підставі аналізу механізму розвитку біогенної сірчаноокислотної корозії та узагальнення сучасних підходів щодо оцінювання технічного стану бетонних конструкцій розроблено алгоритм комплексного обстеження бетонних і залізобетонних конструкцій каналізаційних мереж, що поєднує польові неруйнівні та лабораторні методи досліджень. Алгоритм враховує як прояви корозійних процесів на поверхні конструкції, так і зміни хімічного складу, мікроструктури та фізико-механічних властивостей матеріалу. Алгоритм наведено на рис. 2.

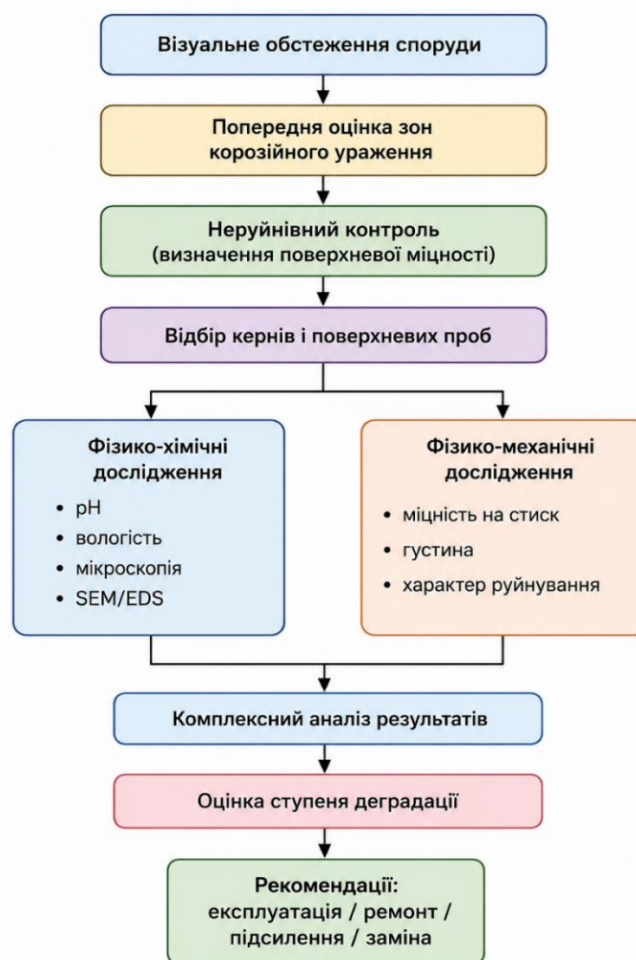


Рис. 2. Алгоритм комплексної діагностики технічного стану бетонних конструкцій каналізаційних мереж, уражених біогенною сірчаноокислотною корозією

Запропонований алгоритм передбачає послідовне виконання візуального обстеження, неруйнівного контролю та відбору зразків матеріалу. Подальше оцінювання відбувається за двома напрямками: визначення фізико-хімічних показників, що характеризують ступінь корозійної деградації цементного каменю, і фізико-механічних характеристик, які відображають залишкову несучу здатність матеріалу. Отримані результати інтегрують для встановлення ступеня деградації конструкції та обґрунтування рекомендацій щодо її подальшої експлуатації, ремонту або заміни.

Для апробації запропонованого алгоритму було вибрано експлуатовану залізобетонну споруду системи водовідведення, яка тривалий час перебувала в умовах впливу газового

середовища каналізаційної мережі та мала характерні ознаки біогенної сірчаноокисlotної корозії (рис. 3). Під час візуального обстеження встановлено наявність значних відкладень на поверхні бетону, локальних руйнувань захисного шару, ділянок розм'якшеного матеріалу та оголення арматури. Виявлені дефекти свідчили про необхідність проведення комплексного оцінювання технічного стану конструкції із застосуванням неруйнівних і лабораторних методів дослідження.

Відповідно до алгоритму, наведеного на рис. 2, було виконано візуальне обстеження, неруйнівний контроль міцності бетону, відбір проб матеріалу та комплекс досліджень відповідно до алгоритму. Узагальнені результати виконаних досліджень наведено в таблиці.



Рис. 3. Характерні ознаки біогенної корозії бетонної конструкції під час апробації алгоритму

Таблиця

Результати комплексного обстеження конструкції з ознаками біогенної сірчаноокисlotної корозії

Показник	Діапазон значень
Міцність, за Шмідтом, МПа	12-16
Вологість, %	6-30
pH	2,3-5,5
Виявлені продукти корозії	гіпс, корозійні новоутворення
Стан структури	деградована

Особливий інтерес становлять результати визначення водневого показника бетону, оскільки саме зміна кислотності є одним з основних індикаторів розвитку біогенної сірчано-кислотної корозії. Проби відбирали у п'яти характерних точках конструкції: у нижній (точки відбору № 1 і 2) і середній (точки відбору № 3 і 4) частинах вертикальних елементів, а також у

зоні перекриття (точка відбору № 5). Для кожної точки визначали значення рН поверхневого деградованого шару та матеріалу внутрішньої частини ядра. Така схема дала змогу оцінити як нерівномірність корозійного ураження за висотою конструкції, так і зміну кислотності за глибиною бетонного перерізу. Отримані результати наведено на рис. 4.

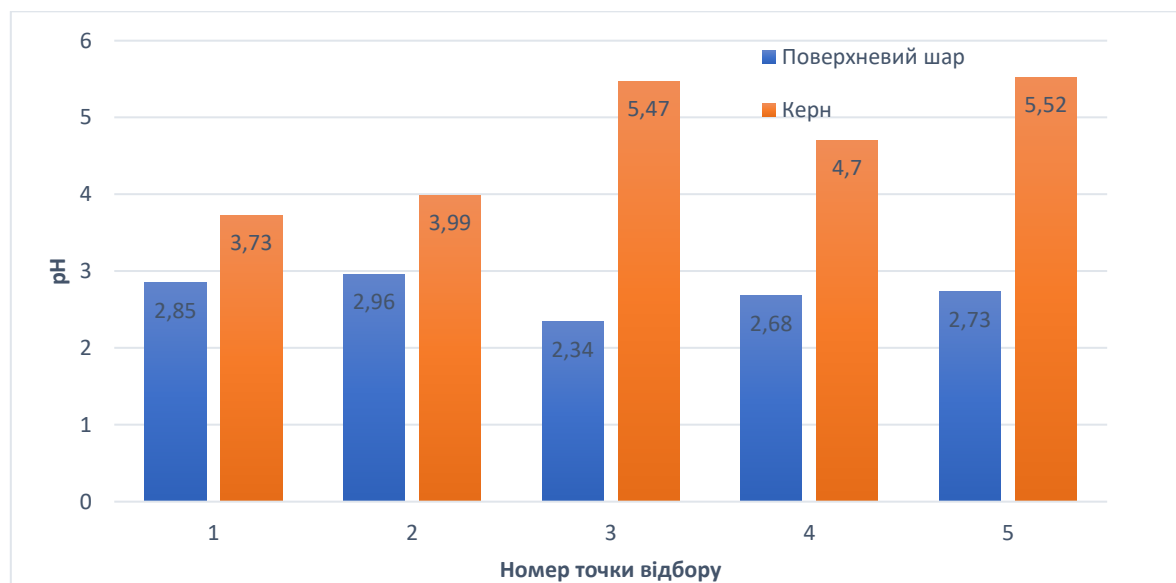


Рис. 4. Розподіл значень рН у поверхневому деградованому шарі та внутрішній частині бетонних кернів у досліджуваних точках відбору проб

Як видно з рис. 4, поверхневий шар бетону має значно нижчі значення рН порівняно з внутрішньою частиною кернів. Це свідчить про розвиток інтенсивних кислотних процесів на поверхні конструкції та поступове проникнення фронту корозійної деградації вглиб бетонного перерізу.

Для підтвердження результатів фізико-хімічних досліджень та ідентифікації продуктів корозії було виконано мікроструктурний аналіз бетону методом сканувальної електронної мікроскопії з енергодисперсійним аналізом (SEM/EDS). Як приклад наведено результати дослідження проб, відібраних в одній із характерних точок обстеження (рис. 5). Аналіз виконували для

поверхневого деградованого шару та матеріалу, відібраного з внутрішньої частини ядра.

Аналіз мікроструктури показав суттєву деградацію цементного каменю та наявність кристалічних новоутворень, характерних для сірчано-кислотної корозії. Результати EDS-аналізу підтвердили наявність сірки, кальцію, кисню та кремнію, що узгоджується з процесами утворення гіпсу та інших продуктів корозійного перетворення цементного каменю. Істотних відмінностей між поверхневим шаром і внутрішньою частиною дослідженого ядра не виявлено, що свідчить про поширення корозійних процесів на значну глибину бетонного перерізу.

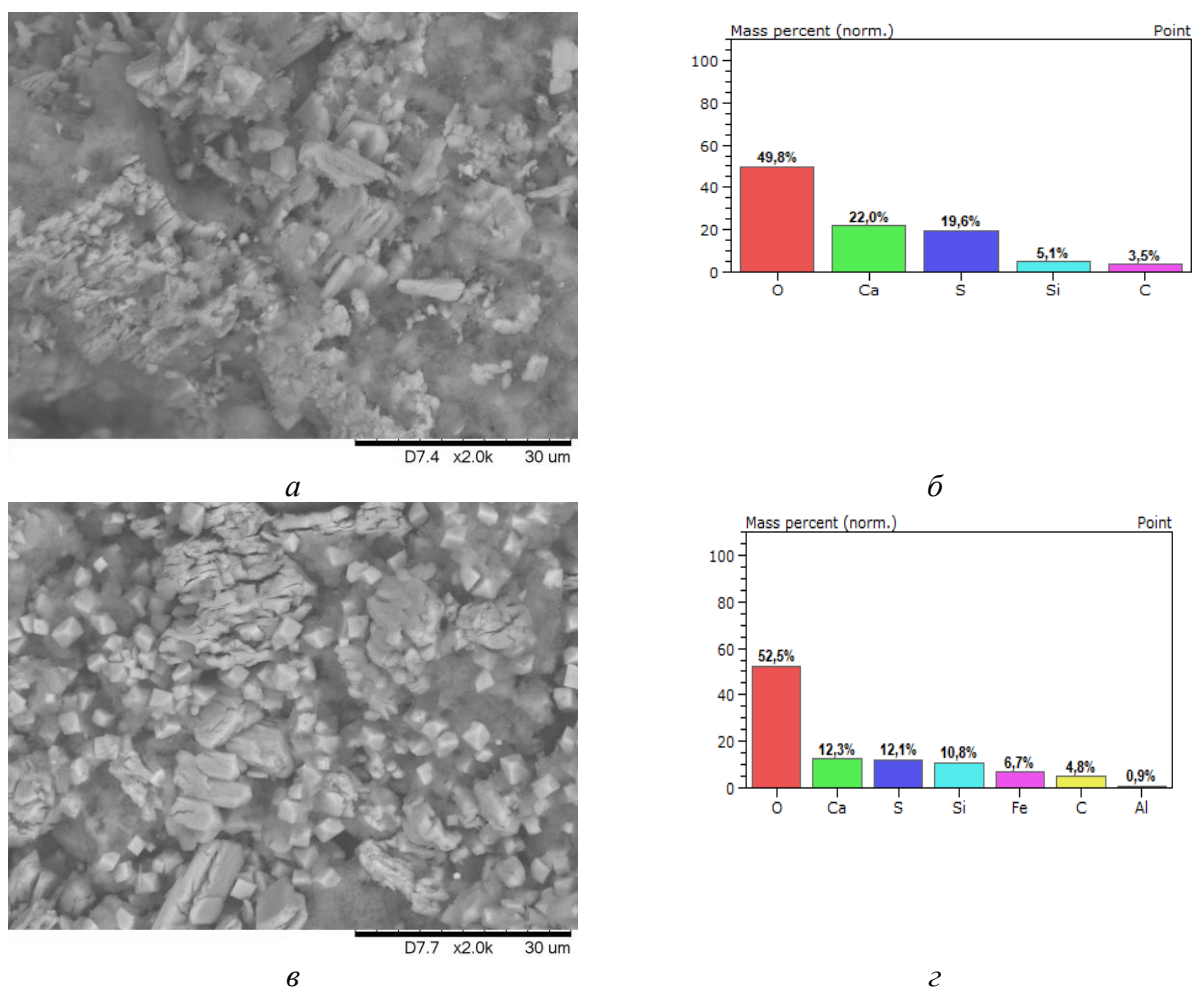


Рис. 5. Результати SEM/EDS-дослідження бетону в характерній точці обстеження: а – структура поверхневого шару; б – елементний склад поверхневого шару; в – структура внутрішньої частини керна; г – елементний склад внутрішньої частини керна

Мікроструктурні дослідження підтвердили висновки, отримані за результатами визначення рН і візуального обстеження. Отже, застосування SEM/EDS у складі запропонованого алгоритму дає змогу не лише встановити факт наявності корозійних процесів, а і підтвердити характер деградації матеріалу та продукти корозійних перетворень.

Висновки. На основі аналізу механізмів розвитку біогенної сірчаноокисlotної корозії визначено комплекс діагностичних показників, що характеризують ступінь деградації бетонних конструкцій каналізаційних мереж: візуальні ознаки пошкодження,

показники міцності, вологість, водневий показник рН, а також мікроструктурні та елементні характеристики матеріалу.

Розроблено алгоритм комплексної діагностики технічного стану бетонних конструкцій каналізаційних мереж, який передбачає послідовне виконання польових і лабораторних досліджень і дає змогу отримувати комплексну оцінку стану матеріалу незалежно від стадії розвитку корозійного процесу.

Під час апробації алгоритму встановлено, що визначальними показниками для оцінювання ступеня деградації досліджуваної конструкції стали результати визначення рН і

мікроструктурного аналізу. Значення рН поверхневого шару бетону становили 2,3-3,0, що відповідає стадії глибокої кислотної деградації цементного каменю та свідчить про втрату його захисних властивостей. Водночас відмінність між значеннями рН поверхневого шару та внутрішньої частини кернів допомогла оцінити глибину поширення фронту кислотної деградації в бетонному перерізі.

Результати мікроструктурних досліджень підтвердили наявність корозійних перетворень цементного каменю та узгоджуються з даними визначення рН, що свідчить про доцільність спільного використання цих методів для діагностики

конструкцій із розвиненою біогенною корозією.

Апробація алгоритму показала, що інформативність окремих методів дослідження може суттєво відрізнятися залежно від ступеня пошкодження конструкції. Тому під час оцінювання технічного стану доцільно використовувати повний комплекс діагностичних процедур, а остаточні висновки та рекомендації щодо подальшої експлуатації, ремонту або заміни конструкції формувати на підставі тих показників, які є найбільш репрезентативними для конкретного об'єкта обстеження.

Список використаних джерел

1. Li, X., Kappler, U., Jiang, G., & Bond, P. L. (2017). The ecology of acidophilic microorganisms in the corroding concrete sewer environment. *Frontiers in Microbiology*, 8, 683. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00683>
2. Wu, M., Wang, T., Wu, K., & Kan, L. (2020). Microbiologically induced corrosion of concrete in sewer structures: a review of the mechanisms and phenomena. *Construction and Building Materials*, 239, 117813. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117813>
3. Pramanik, S. K., Bhuiyan, M., Robert, D., Roychand, R., Gao, L., Cole, I., & Pramanik, B. K. (2024). Bio-corrosion in concrete sewer systems: mechanisms and mitigation strategies. *Science of the Total Environment*, 921, 171231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171231>
4. Grengg, C., Mittermayr, F., Ukrainczyk, N., Koraimann, G., Kienesberger, S., & Dietzel, M. (2018). Advances in concrete materials for sewer systems affected by microbial induced concrete corrosion: a review. *Water Research*, 134, 341–352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.043>
5. Huber, B., Hilbig, H., Drewes, J. E., & Müller, E. (2017). Evaluation of concrete corrosion after short- and long-term exposure to chemically and microbially generated sulfuric acid. *Cement and Concrete Research*, 94, 36–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.01.005>
6. Buvignier, A., Patapy, C., Peyre Lavigne, M., Paul, E., & Bertron, A. (2024). Assessment of the durability of various cementitious materials subjected to low levels of H₂S in wastewater networks. *Materials and Structures*, 57 (4), 87. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02346-6>
7. Li, X., Bond, P. L., O'Moore, L., Wilkie, S., Hanzic, L., Johnson, I., Mueller, K., Yuan, Z., & Jiang, G. (2020). Increased resistance of nitrite-admixed concrete to microbially induced corrosion in real sewers. *Environmental Science & Technology*, 54 (4), 2323–2333. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06680>
8. Merachtsaki, D., Tsardaka, E.-C., Anastasiou, E., & Zouboulis, A. (2021). Evaluation of the protection ability of a magnesium hydroxide coating against the bio-corrosion of concrete sewer pipes, by using short and long duration accelerated acid spraying tests. *Materials*, 14 (17), 4897. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14174897>
9. Kaushal, V., Najafi, M., Love, J., Nahar Sharar, D. (2022). Microbiologically induced corrosion of concrete in sanitary sewer pipes and manholes: field surveys and laboratory assessment.

Advances in Environmental and Engineering Research, 3 (2), 027. DOI: <https://doi.org/10.21926/aer.2202027>

10. Wu, L., Hu, C., & Liu, W. V. (2018). The sustainability of concrete in sewer tunnel — a narrative review of acid corrosion in the city of Edmonton, Canada. *Sustainability*, 10, (2), 517. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10020517>

11. Islander, R. L., Devlinny, J. S., Mansfeld, F., Postyn, A., & Shih, H. (1991). Microbial Ecology of Crown Corrosion in Sewers. *Journal of Environmental Engineering. ASCE*, 117 (6), 751-770. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1991)117:6(751)

12. Mori, T., Nonaka, T., Tazaki, K., Koga, M., Hikosaka, Y., & Noda, S. (1992). Interactions of Nutrients, Moisture and pH on Microbial Corrosion of Concrete Sewer Pipes. *Water Research*, 26 (1), 29-37. doi: 10.1016/0043-1354(92)90107-F

13. Santhanam, M., Cohen, M. D., & Olek, J. (2001). Mechanism of sulfate attack: A fresh look. Part 1: Summary of experimental results of ettringite and gypsum formation. *Cement and Concrete Research*, 31(1), 39-44.

14. Tian, B., & Cohen, M. D. Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion? *Cement and Concrete Research*. 2000, 30 (1), 13–23.

References

1. Li, X., Kappler, U., Jiang, G., & Bond, P. L. (2017). The ecology of acidophilic microorganisms in the corroding concrete sewer environment. *Frontiers in Microbiology*, 8, 683. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00683>

2. Wu, M., Wang, T., Wu, K., & Kan, L. (2020). Microbiologically induced corrosion of concrete in sewer structures: a review of the mechanisms and phenomena. *Construction and Building Materials*, 239, 117813. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117813>

3. Pramanik, S. K., Bhuiyan, M., Robert, D., Roychand, R., Gao, L., Cole, I., & Pramanik, B. K. (2024). Bio-corrosion in concrete sewer systems: mechanisms and mitigation strategies. *Science of the Total Environment*, 921, 171231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171231>

4. Grengg, C., Mittermayr, F., Ukrainczyk, N., Koraimann, G., Kienesberger, S., & Dietzel, M. (2018). Advances in concrete materials for sewer systems affected by microbial induced concrete corrosion: a review. *Water Research*, 134, 341–352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.043>

5. Huber, B., Hilbig, H., Drewes, J. E., & Müller, E. (2017). Evaluation of concrete corrosion after short- and long-term exposure to chemically and microbially generated sulfuric acid. *Cement and Concrete Research*, 94, 36–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.01.005>

6. Buvignier, A., Patapy, C., Peyre Lavigne, M., Paul, E., & Bertron, A. (2024). Assessment of the durability of various cementitious materials subjected to low levels of H₂S in wastewater networks. *Materials and Structures*, 57 (4), 87. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02346-6>

7. Li, X., Bond, P. L., O'Moore, L., Wilkie, S., Hanzic, L., Johnson, I., Mueller, K., Yuan, Z., & Jiang, G. (2020). Increased resistance of nitrite-admixed concrete to microbially induced corrosion in real sewers. *Environmental Science & Technology*, 54 (4), 2323–2333. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06680>

8. Merachtsaki, D., Tsardaka, E.-C., Anastasiou, E., & Zouboulis, A. (2021). Evaluation of the protection ability of a magnesium hydroxide coating against the bio-corrosion of concrete sewer pipes, by using short and long duration accelerated acid spraying tests. *Materials*, 14 (17), 4897. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14174897>

9. Kaushal, V., Najafi, M., Love, J., Nahar Sharar, D. (2022). Microbiologically induced corrosion of concrete in sanitary sewer pipes and manholes: field surveys and laboratory assessment.

Advances in Environmental and Engineering Research, 3 (2), 027. DOI: <https://doi.org/10.21926/aeer.2202027>

10. Wu, L., Hu, C., & Liu, W. V. (2018). The sustainability of concrete in sewer tunnel — a narrative review of acid corrosion in the city of Edmonton, Canada. *Sustainability*, 10, (2), 517. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10020517>

11. Islander, R. L., Devlin, J. S., Mansfeld, F., Postyn, A., & Shih, H. (1991). Microbial Ecology of Crown Corrosion in Sewers. *Journal of Environmental Engineering. ASCE*, 117 (6), 751-770. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1991)117:6(751)

12. Mori, T., Nonaka, T., Tazaki, K., Koga, M., Hikosaka, Y., & Noda, S. (1992). Interactions of Nutrients, Moisture and pH on Microbial Corrosion of Concrete Sewer Pipes. *Water Research*, 26 (1), 29-37. doi: 10.1016/0043-1354(92)90107-F

13. Santhanam, M., Cohen, M. D., & Olek, J. (2001). Mechanism of sulfate attack: A fresh look. Part 1: Summary of experimental results of ettringite and gypsum formation. *Cement and Concrete Research*, 31(1), 39-44.

14. Tian, B., & Cohen, M. D. Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion? *Cement and Concrete Research*. 2000, 30 (1), 13-23.

Гудименко Микола Сергійович, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0008-4190-8150.

E-mail: Hudymenko000@gmail.com.

Юй Вей, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0006-5783-5625. E-mail: 741034741@qq.com.

Борзяк Ольга Сергіївна, доктор технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту, професор кафедри будівельної фізики та будівельних матеріалів Західнопоморського технологічного університету, Щецин. ORCID iD: 0000-0002-8815-6936. E-mail: oborziak@zut.edu.pl.

Hudymenko Mykola, postgraduate student, department of building materials and structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0008-4190-8150. E-mail: Hudymenko000@gmail.com.

Yu Wei, postgraduate student, department of building materials and structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0006-5783-5625. E-mail: 741034741@qq.com.

Borziak Olga, Dr. Sc. (Tech.), Associate Professor, department of building materials and structures, Ukrainian State University of Railway Transport, Associate Professor, department of building physics and building materials West Pomeranian University of Technology, Szczecin. ORCID iD: 0000-0002-8815-6936. E-mail: oborziak@zut.edu.pl.

Дата надходження статті: 28.07.2026 р.

Дата прийняття статті до друку: 25.09.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY