

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2026.3.2>

Received: 13.03.2026  
Revised: 15.05.2026  
Accepted: 29.05.2026  
Published: 29.05.2026

УДК 666.97:620.193.4:  
620.169

Віталій ГРІНЧЕНКО, Олексій СІКОРСЬКИЙ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

СУЧАСНІ МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ  
СУЛЬФАТОСТІЙКОСТІ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ  
ДОВГОВІЧНОСТІ БЕТОНУ: СИСТЕМАТИЧНИЙ ОГЛЯД

**Мета.** Мета роботи полягає у виявленні та систематизації основних обмежень сучасних методів випробування сульфатостійкості бетону, які знижують їхню надійність для прогнозування реальної поведінки конструкцій в агресивних середовищах експлуатації, а також аналіз перспективних шляхів подолання цих обмежень з урахуванням потреб України щодо відновлення та модернізації об'єктів водовідведення.

**Методика.** Дослідження базується на систематичному огляді та якісному синтезі даних, отриманих з первинних експериментальних досліджень та оглядово-аналітичних публікацій, а також нормативно-правових документів. Огляд джерел здійснено з використанням наукометричних баз Scopus та Web of Science за критеріями фокусу на методах випробування сульфатостійкості, ідентифікації обмежень протоколів та дослідження кореляції лабораторних і натурних результатів. Прикладну частину сформовано на основі даних Національної доповіді про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2024 році.

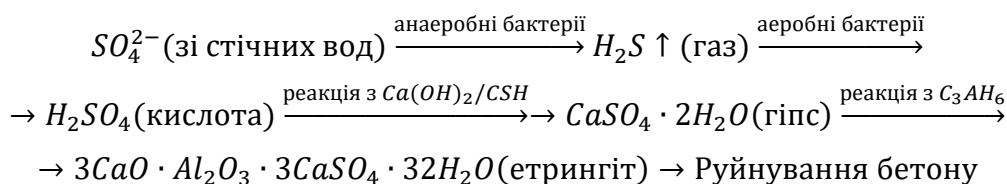
**Результати.** Виявлено шість основних категорій обмежень: неможливість адекватного відтворення реальних умов експлуатації, недосконалість існуючих стандартів, обмеження часового масштабу, недостатня надійність вимірювальних показників і підходів, нерепрезентативність зразків і матеріалів, неузгодженість хімічних та біогенних методів випробувань. Встановлено, що прискорені тести з висококонцентрованими розчинами здатні змінювати механізми деградації, а не тільки пришвидшувати їх. Чинні стандарти ASTM C1012, SIA 262/1, CSA A3004-C8, DIN 19573 та GB/T 50082 суттєво розрізняються за умовами випробувань і критеріями оцінювання, а Європейський комітет CEN не має уніфікованого протоколу.

**Наукова новизна.** Полягає в системному зіставленні методологічних обмежень міжнародних протоколів випробування сульфатостійкості з прикладними вимогами оцінювання довговічності бетону в умовах інфраструктурної кризи в Україні, що дало змогу обґрунтувати пріоритетні напрями адаптації цих протоколів для потреб відновлення сектору водовідведення.

**Практична значимість.** Запропонована систематика обмежень може бути використана при формуванні технічних завдань для лабораторних випробувань бетонів для ремонту й реконструкції 417 очисних споруд і понад 14,7 тис. км аварійних мереж централізованого водовідведення, а також при гармонізації національних нормативних документів з вимогами Закону України № 2887-IX та директив Європейського Союзу.

**Ключові слова:** бетон; сульфатостійкість бетону; методи випробування; біогенна корозія; каналізаційні мережі; прискорені випробування; очисні споруди.

**Вступ.** Бетонні конструкції, що експлуатуються в сульфатному середовищі, зазнають значного негативного впливу, який спричиняє їх передчасне руйнування та необхідність дороговартісного ремонту із застосуванням спеціалізованих матеріалів. Сульфатна агресія поєднує процеси хімічного та фізичного характеру і додатково ускладнюється біогенною компонентою в каналізаційних середовищах, що створює перешкоди для її повноцінного відтворення в лабораторних умовах:



Правильне оцінювання сульфатостійкості бетону має вирішальне значення для проєктування, ремонту й експлуатації каналізаційних мереж, очисних споруд, заглиблених фундаментів та морських об'єктів. Проте існуючі методи випробувань характеризуються деякими обмеженнями, за рахунок чого не можна повністю спрогнозувати реальну поведінку конструкцій в умовах експлуатації.

Для України, враховуючи критичний стан інфраструктури водовідведення та масштабні руйнування галузі внаслідок воєнних дій, дана проблема стала надзвичайно гострою. За даними Національної доповіді про якість питної води та стан питного водопостачання й водовідведення в Україні у 2024 році, 41,9% мереж централізованого водовідведення перебувають у ветхому та аварійному стані, із 714 очисних споруд 417 (58,4%) потребують реконструкції, а темпи заміни мереж становлять лише 0,8% на рік [1]. За оцінкою Світового банку, збитки сектору водопостачання та водовідведення внаслідок збройної агресії складають 4,6 млрд дол. США [1]. Ухвалений у 2024 році Закон України «Про водовідведення та очищення стічних вод» [2] закладає правову основу модернізації галузі. Саме тому надійне оцінювання довговічності бетону в сульфатних і біогенних середовищах має для України не лише академічне, а й стратегічне практичне значення.

Сучасні дослідження сульфатостійкості охоплюють досить широкий спектр різних методологічних підходів: стандартизовані хімічні випробування за ASTM C1012 [3, 4] та національні стандарти різних країн – SIA 262/1, CSA A3004-C8, DIN 19573, GB/T 50082 [5–7]; мікробіологічне моделювання за участі сіркоокиснювальних бактерій [8, 9]; натурні випробування у каналізаційних колекторах [10, 11]; неруйнівні методи з використанням ультразвуку, комп'ютерної томографії та фрактального аналізу [12–14]; прогностичні моделі на основі машинного навчання [15, 16]. Але умови випробувань суттєво відрізняються між собою: концентрація сульфатної кислоти варіюється від рН 0,0 до 3,4 [7, 17, 18], концентрація сульфату натрію – від 3% до 10% [12, 14, 19], тривалість випробувань – від 7 діб до 4 років [20, 21].

Можна виокремити кілька системних, невирішених проблем. По-перше, прискорені тести з висококонцентрованими розчинами не лише пришвидшують деградацію, а й здатні змінювати самі її механізми, зокрема при дії сульфатів магнію [3, 20], що робить такі тести непридатними для прогнозування терміну служби в реальних умовах [5, 10]. По-друге, хімічні випробування з  $\text{H}_2\text{SO}_4$  не охоплюють біогенну компоненту, яка домінує в каналізаційних середовищах [22]. По-третє, наразі відсутній загальноприйнятий міжнародний стандарт випробування сульфатостійкості: Європейський комітет CEN такого протоколу не має, а національні норми суттєво розходяться за методикою [3, 17, 23, 24]. По-четверте, чинні методи слабо враховують комбіновану дію сульфатів і циклів заморожування-відтавання, температурних коливань та хлорид-іонів [6, 25]. Незважаючи на наявність окремих оглядових публікацій з даної проблематики, у літературі бракує системного зіставлення методологічних обмежень з прикладними вимогами оцінювання довговічності бетону в умовах інфраструктурної кризи в Україні, що й визначає напрям цієї статті.

**Постановка завдання.** Мета даної статті полягає у виявленні та систематизації основних обмежень сучасних методів випробування сульфатостійкості бетону, які знижують їхню надійність для прогнозування реальної поведінки конструкцій в агресивних експлуатаційних середовищах, а також обґрунтування перспективних шляхів подолання цих обмежень з урахуванням прикладних потреб України щодо відновлення й модернізації об'єктів водовідведення. Для досягнення поставленої мети розв'язано такі завдання: проведено систематичний аналіз 33 джерел за період 2000–2025 років; визначено 6 основних категорій обмежень існуючих протоколів випробувань; зіставлено наявні методологічні підходи зі специфічними умовами каналізаційних середовищ і комбінованих експлуатаційних впливів; узагальнено перспективні напрями подальших досліджень із врахуванням стратегічних потреб України.

**Результати дослідження.** Основна проблема існуючих методів полягає в тому, що прискорені випробування, в яких застосовуються високі концентрації сульфатів, змінюють механізми деградації зразків, посилюють процеси декальцинації [20], а тому є нерепрезентативними для реальних умов експлуатації [3, 5]. Випробування, що проводяться із застосуванням сульфатної кислоти також призводять до процесів деградації зразків, які відрізняються від натурних умов, і є непридатними для надійного прогнозування терміну служби каналізаційних споруд [10].

Особливо складно відтворити біогенну сірчаноокислу корозію в каналізаційних середовищах. Лабораторні випробування не можуть повною мірою охопити мікробіологічні процеси, які найбільше впливають на фактичну деградацію стічних мереж [22]. Результати хімічних випробувань з  $H_2SO_4$  значно відрізняються від тих, що отримані за участі мікробіологічно продукованої  $H_2SO_4$ . Наприклад, мікрокремнезем та зола виносу покращували стійкість зразків у хімічних тестах, але у разі мікробіологічного впливу не показували послідовного покращення [8]. Надзвичайно складним завданням є відтворення реальних каналізаційних умов в лабораторії, а саме: комплексна дія мікробіологічного впливу, складність контролю температури та вологості, а також безпекові ризики, що пов'язані з утворенням газу  $H_2S$  [9].

В існуючих методах не відтворюються повноцінно реальні умови з одночасною дією кількох агресивних факторів [25]. Іноді у випробуваннях досліджується одночасний вплив як сульфатної агресії, так і циклів заморожування-відтавання, однак результати таких випробувань відрізняються від умов експлуатації [6]. А вплив циклів зволоження-висихання, зміни температури, ламінарного потоку та хлорид-іонів не повністю відтворюється в існуючих протоколах досліджень [3, 5, 18]. Цикли зволоження-відтавання іноді включаються в протокол, проте вони не стандартизовані і демонструють суттєву розбіжність в різних дослідженнях [5]. Вплив ламінарного потоку також досліджується в окремих випробуваннях, але не відображає повноцінно складну гідродинаміку реальних умов [18]. Фізико-хімічна деградація зразків у розчинах сульфатів моделюється нерівномірно, особливо у випадках, коли В/Ц зразків відрізняється [26].

На даний час немає загального глобального стандарту чи протоколу дослідження для випробування стійкості бетону до сульфатноокислої агресії [17, 23, 24]. Умови випробувань та оцінка результатів відрізняються залежно від країни. Наприклад, в Європі немає уніфікованого стандарту для визначення сульфатостійкості [3]. Національні ж стандарти інших країн (швейцарський SIA 262/1, канадський CSA A3004-C8, німецький DIN 19573 та китайський GB/T 50082-2024) суттєво відрізняються за методами підготовки зразків, режимами попередньої витримки, умовами експозиції та критеріями оцінювання результатів [5, 27].

Зараз найбільш широко застосовується американський стандарт ASTM C1012, але і в ньому є суттєві обмеження. Він переважно орієнтований на випробування розчинових сумішей, а не бетонних, має суттєву розбіжність результатів під час тестування в різних лабораторіях, і не відтворює реальну поведінку конструкцій в умовах експлуатації [4]. Інший стандарт ASTM C452-15 застосовується лише для класичного портландцементу без добавок [3]. ASTM C267 обмежується застосуванням для певних типів бетону [28].

Для різних досліджень змінними є ключові параметри: концентрація розчину, частота оновлення розчину, геометрія зразків, умови витримки, інтервали вимірювань та критерії оцінювання [27, 29]. Частота оновлення розчину неоднаково враховується в різних протоколах, але при цьому часто визначається як основний параметр, який впливає на втрату маси та швидкість деградації зразків [29].

Також різні індикатори не можна однаковим чином застосувати до звичайного портландцементу та, наприклад, лужноактивованого в'язучого. Універсального показника стійкості до сульфатної кислоти немає, а візуальна оцінка часто є суб'єктивною [7, 28]. Немає кореляції між споживанням кислоти та зміною міцності на стиск, зміна маси може відрізнитися

через можливі сколювання самих зразків, а глибина втрати лужності значною мірою залежить від початкової лужності та типу матеріалу [7, 28]. Існуючі стандарти передбачають однорідність матеріалу, а тому є неприйнятними для бетонних елементів, що виготовлені за допомогою 3D-друку, що мають анізотропні властивості [30].

Ще однією проблемою є тривалість випробувань на сульфатостійкість. Стандартні випробування згідно ASTM C1012 потребують до 18 місяців для оцінки розчинів [4], а метод USBR 4908 для бетонних зразків – до 2 років [3]. В той же час для прогнозування довгострокової поведінки бетонних конструкцій навіть таких тривалих термінів може бути недостатньо [8, 23, 31].

За допомогою прискорених методів можна швидко отримати результати, але їх достовірність буде не точною. Вже існують методи, що скорочують тривалість випробувань з 12 місяців до 21 дня для розчинів та з 6 місяців до 56 днів для бетону [4]. Але таке значне скорочення термінів ставить під сумнів правильність процесу деградації зразків [16]. Високі концентрації чи підвищена температура можуть кардинально змінити механізм сульфатної атаки [8, 20]. Як правило, властивості бетону при сульфатній агресії спочатку покращуються, а потім з часом погіршуються. Відповідно дослідження на різних часових етапах (від 3 місяців до декількох років) можуть охоплювати різні стадії деградації [19, 26].

Тому одним з основних невирішених питань залишається встановлення надійного співвідношення між прискореними методами та реальними умовами витримки [24]. Об'єктивно складно одержати довгострокові дані про корозію в реальних умовах, проте без цих даних обґрунтованість прискорених методів підтвердити неможливо [24].

Помітні недоліки мають також окремі вимірювальні підходи. Наприклад, нерівномірний розподіл крупного заповнювача в бетоні може давати неточні результати вимірювання швидкості ультразвукового імпульсу (UPV) [13]. Цей метод також не реагує на оптимізацію мікропористої структури матеріалу на ранніх стадіях [14]. Метод комп'ютерної томографії хоч і дає детальні зображення внутрішніх пошкоджень, однак він дороговартісний і за його допомогою не завжди можливо точно ідентифікувати тяжкість пошкоджень [12, 13]. А стандартні тензометричні датчики, наприклад, не можна надійно закріпити на зразках, що піддалися корозії [23].

Навіть типові параметри вимірювань часто важко інтерпретувати. Внаслідок сколювання та утворення гіпсу на поверхні зразків вимірювання втрати маси не стандартизовані між різними протоколами [5, 28, 29]. Випробування міцності на стиск є руйнівним методом і для моніторингу в реальному часі не підходить [14]. При вимірюванні розширення припускається повне проникнення сульфату в зразок, але на практиці це практично не відбувається [5]. Для різних в'язучих систем глибина нейтралізації рН також буде різною, тому що залежить від початкової лужності матеріалу [7].

Одним із перспективних підходів є метод тривимірного фрактального аналізу кородованих поверхонь [17, 24], однак ще остаточно не встановлено його зв'язок з реальними показниками експлуатації [17]. Для моніторингу внутрішніх змін рН застосовуються також рН-сенсори на основі оксидів іридію, які в сильному кислотному середовищі можуть розчинятися [32]. Сучасним методом прогнозування деградації є моделі машинного навчання. Вони можуть мати високі коефіцієнти кореляції ( $R^2=0,9739$  для PSO-LSTM), проте дещо обмежені доступністю даних [16].

Як вже згадувалося, більшість випробувань проводиться на розчинових зразках, а не бетонних. Однак такий підхід залишає поза увагою вплив крупного заповнювача та зони контакту «заповнювач-матриця» (interfacial transition zone, ITZ) [3, 5]. Невеликі розміри зразків не можуть повною мірою репрезентувати реальні умови [5]. Тому результати, отримані для розчинів чи цементної пасти, не можна безпосередньо застосувати для бетону [8]. Зразки бетону, відібрані з натурних об'єктів, є неоднорідними, що ускладнює як інтерпретацію результатів, так і їх відтворюваність та надійність [12].

Для нових класів матеріалів та в'язучих наявні методи можуть бути не зовсім придатними. Для лужноактивованих в'язучих [9, 11], геополімерів та інших нетрадиційних матеріалів [5] існуючі стандарти можуть мати обмеження щодо застосування. А для бетонних елементів, виготовлених за допомогою 3D-друку, які мають анізотропні властивості за рахунок пошарового формування, протоколи випробувань фактично відсутні [30]. Для гібридних в'язучих систем на основі алюмінатного цементу з додаванням доменного гранульованого шлаку (CAC+GGBFS) також виявлено, що чинні методи оцінювання сульфатостійкості не повною мірою враховують специфіку формування продуктів гідратації, що ускладнює прогнозування довговічності таких систем [33].

Згадані раніше розбіжності між суто хімічними випробуваннями в розчинах сульфатів або кислот та біогенною корозією є окремою категорією обмежень. У процесі корозії беруть участь сірчаноокиснювальні бактерії (зокрема, *Acidithiobacillus thiooxidans*). Тому чисто хімічні випробування не здатні повною мірою відтворити динаміку деградації, що відбувається в реальних умовах [8, 22].

Вже застосовуються методи, які моделюють біогенну корозію. Такі мікробіологічні випробування більш реалістичні порівняно зі стандартними, проте є складними як з технічної точки зору, так і для стандартизації [9, 28]. Для їх реалізації потрібне спеціалізоване обладнання та контрольований ріст бактерій, а також врахування безпекових ризиків, пов'язаних з утворенням газу  $H_2S$  [9, 28].

Існує також комбінований підхід, який враховує взаємодію біологічних та хімічних процесів. Однак його практичне впровадження залишається обмеженим [22].

Висновки щодо опрацьованих джерел є неоднозначними. Це значною мірою зумовлено різними умовами експлуатації, за яких відбувається сульфатна агресія. У дослідженнях, що орієнтовані на каналізаційні середовища, звертається увага на неспроможність суто хімічних випробувань достовірно відтворити механізми біогенної корозії [8, 9, 10, 11, 22]. Дослідження, які зосереджені на заглиблених конструкціях, що експлуатуються в сульфатних ґрунтах чи в морських середовищах, роблять основний акцент на концентрації агресивного середовища, іонній взаємодії то комбінованих процесах деградації [6, 20, 25]. Однак обидва напрямки визначають, що прискорені методи випробувань можуть змінювати механізм деградації, але характер цієї зміни залежить від фактичних умов експлуатації.

Сучасні неруйнівні підходи, що поєднують комп'ютерну томографію з вимірюванням швидкості ультразвукового імпульсу (UPV) [13], а також характеристика поверхні за допомогою тривимірного фрактального аналізу [17, 24] усувають окремі обмеження вимірювань, однак вони поки що не стандартизовані, і тому не можуть повноцінно інтегруватись до існуючих систем оцінювання.

Вибір системи матеріалів також впливає на різницю між лабораторними та натурними результатами. Чинні норми найбільш придатні у разі випробувань систем на основі звичайного портландцементу у середовищах розчинів з низькою концентрацією [20]. В цьому випадку стандартні показники (розширення, втрата маси, зниження міцності) демонструють прийнятну кореляцію з реальними умовами [20]. Але для лужноактивованих в'язучих систем та геополімерів ці показники можуть давати доволі суперечливі чи навіть хибні результати, оскільки їх механізми деградації відрізняються від систем на основі портландцементу [11, 28].

Лабораторні мікробіологічні випробування (MIC) з тіосульфатом як джерелом сірки [9] демонструють, що умови біогенної корозії можна частково відтворити. При цьому можна отримати характер деградації, подібний до реальних умов. Однак тривалість такого випробування складає 6 місяців і потребує підтримки мікробіологічної культури, що обмежує його практичне впровадження.

Дослідження, що безпосередньо порівнюють багаторічні лабораторні та натурні результати, послідовно доводять, що прискорені методи придатні для порівняльного

скринінгу матеріалів, але непридатні для надійного прогнозування терміну служби конструкцій [10, 11, 20].

Для України, враховуючи масштаб інфраструктурної кризи, ці обмеження створюють також специфічну прикладну проблему. Значний відсоток аварійних мереж та очисних споруд, що потребують реконструкції [1], вимагає методів, які можуть реалістично відтворити комбіновану дію сульфатної агресії, біогенної корозії та циклічних температурно-вологісних навантажень. А, оскільки, ця проблема є нагальною, то розробка точних та швидких методів має бути пріоритетною.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробленні методів з реалістичними концентраціями сульфатів, які зберігають натурні механізми деградації за прийнятною тривалості випробувань; стандартизації мікробіологічних випробувань біогенної корозії на основі тіосульфату; створенні протоколів для комбінованих впливів (сульфатна агресія, заморожування-відтавання, хлорид-іони); уніфікації показників експлуатаційних властивостей для різних в'язучих систем; а також у подальшому розвитку неруйнівних методів і прогностичних моделей машинного навчання з валідацією на довгострокових натурних даних. Принциповим є те, що чинні хімічні прискорені тести залишаються придатними для порівняльного скринінгу матеріалів, проте остаточне рішення щодо терміну служби конструкцій має спиратися на комплексний підхід, який поєднує лабораторні, мікробіологічні та натурні методи оцінювання.

#### Висновки.

1. Прискорені тести з висококонцентрованими розчинами не лише пришвидшують деградацію, а й здатні змінювати її механізми, внаслідок чого результати таких випробувань є непридатними для надійного встановлення терміну служби конструкцій.

2. Встановлено шість основних категорій обмежень існуючих методів: неможливість відтворення реальних біогенних процесів у каналізаційних середовищах; відсутність уніфікованого протоколу на рівні СЕН; обмеження часового масштабу; недостатня надійність вимірвальних показників; нерепрезентативність розчинових зразків щодо бетонних конструкцій; неузгодженість хімічних і біогенних методів випробувань.

3. Запропонована систематика обмежень може бути використана при формуванні технічних завдань на лабораторні випробування бетонів для реконструкції 417 очисних споруд і понад 14,7 тис. км аварійних мереж централізованого водовідведення в Україні та для гармонізації національної нормативної бази з вимогами Закону України № 2887-IX і європейських директив.

4. Подальші дослідження варто спрямувати на розробку методів з реалістичними концентраціями сульфатів, стандартизацію мікробіологічних випробувань біогенної корозії, створення протоколів для комбінованих експлуатаційних впливів, а також на розвиток неруйнівних методів і прогностичних моделей машинного навчання.

#### References

1. Ministry of Community and Territorial Development of Ukraine (2025). Natsionalna dopovid pro yakist pytnoi vody ta stan pytnoho vodopostachannia ta vodovidvedennia v Ukraini u 2024 rotsi [National report on the quality of drinking water and the state of drinking water supply and wastewater disposal in Ukraine in 2024]. Kyiv. URL: <https://mindev.gov.ua/diialnist/napriamy/sfera-komunalnykh-posluh/tsentralizovane-vodopostachannia-ta-vodovidvedennia/natsionalna-dopovid-pro-iakist-pytnoi-vody-ta-stan-pytnoho-vodopostachannia-v-ukraini> [in Ukrainian].

#### Література

1. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2024 році / Міністерство розвитку громад та територій України. Київ, 2025. URL: <https://mindev.gov.ua/diialnist/napriamy/sfera-komunalnykh-posluh/tsentralizovane-vodopostachannia-ta-vodovidvedennia/natsionalna-dopovid-pro-iakist-pytnoi-vody-ta-stan-pytnoho-vodopostachannia-v-ukraini> (дата звернення: 13.03.2026).

2. Verkhovna Rada of Ukraine (2023). Pro vodovidvedennia ta ochyshchennia stichnykh vod [On water drainage and wastewater treatment: Law of Ukraine dated 12.01.2023 No. 2887-IX]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2887-20> [in Ukrainian].
3. Jabbour, M., Metalssi, O. O., Quiertant, M., & Baroghel-Bouny, V. (2022). A critical review of existing test-methods for external sulfate attack. *Materials*, 15(21), Article 7554. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15217554>.
4. Mousavinezhad, S., Toledo, W. K., Newton, C. M., & Aguayo, F. (2024). Rapid assessment of sulfate resistance in mortar and concrete. *Materials*, 17(19), Article 4678. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17194678>.
5. Wang, Q., Kunther, W., Li, Y., Visalakshi, T., Gomasa, R., Amroun, S., De Souza, D. J., Kasaniya, M., Tole, I., Li, X., Hooton, R. D., Suraneni, P., & Wilson, W. (2025). Sulfate attack testing approaches from concrete to cement paste: A review by RILEM TC 298-EBD. *Materials and Structures*, 58, Article 232. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02759-x>.
6. Wu, H., Lv, C., Xu, Y., Sun, Y., & Qu, S. (2025). Deterioration of concrete under the combined action of sulfate attack and freeze-thaw cycles: A review. *Materials*, 18(18), Article 4309. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18184309>.
7. Santos, B. S., Machini, W. B. S., Matias, G., Moreira, N. F. S. T., Portugal, P. M. M., Torres, I., Tadeu, A., & Almeida, J. A. S. (2025). Mortars with enhanced chemical resistance: Effects of sulphuric acid exposure. *Developments in the Built Environment*, 21, Article 100592. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100592>.
8. Monteny, J., Vincke, E., Beeldens, A., De Belie, N., Taerwe, L., Van Gemert, D., & Verstraete, W. (2000). Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cement and Concrete Research*, 30(4), 623–634. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00219-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00219-2).
9. Khan, H. A., Yasir, M., & Castel, A. (2022). Performance of cementitious and alkali-activated mortars exposed to laboratory simulated microbially induced corrosion test. *Cement and Concrete Composites*, 128, Article 104445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104445>.
10. Khan, H. A., Castel, A., Khan, M. S. H., & Mahmood, A. H. (2019). Durability of calcium aluminate and sulphate resistant Portland cement based mortars in aggressive sewer environment and sulphuric acid. *Cement and Concrete Research*, 124, Article 105852. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105852>.
11. Khan, H. A., Castel, A., & Khan, M. S. H. (2020). Corrosion investigation of fly ash based geopolymer
2. Про водовідведення та очищення стічних вод: Закон України від 12.01.2023 № 2887-IX. *Верховна Рада України: офіц. вебпортал*. 2023. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2887-20> (дата звернення: 13.03.2026).
3. Jabbour M., Metalssi O. O., Quiertant M., Baroghel-Bouny V. A critical review of existing test-methods for external sulfate attack. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 21. Article 7554. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15217554>.
4. Mousavinezhad S., Toledo W. K., Newton C. M., Aguayo F. Rapid assessment of sulfate resistance in mortar and concrete. *Materials*. 2024. Vol. 17, No. 19. Article 4678. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17194678>.
5. Wang Q., Kunther W., Li Y. et al. Sulfate attack testing approaches from concrete to cement paste: a review by RILEM TC 298-EBD. *Materials and Structures*. 2025. Vol. 58. Article 232. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02759-x>.
6. Wu H., Lv C., Xu Y. et al. Deterioration of concrete under the combined action of sulfate attack and freeze-thaw cycles: A review. *Materials*. 2025. Vol. 18, No. 18. Article 4309. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18184309>.
7. Santos B. S., Machini W. B. S., Matias G. et al. Mortars with enhanced chemical resistance: Effects of sulphuric acid exposure. *Developments in the Built Environment*. 2025. Vol. 21. Article 100592. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100592>.
8. Monteny J., Vincke E., Beeldens A. et al. Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cement and Concrete Research*. 2000. Vol. 30, No. 4. P. 623–634. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00219-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00219-2).
9. Khan H. A., Yasir M., Castel A. Performance of cementitious and alkali-activated mortars exposed to laboratory simulated microbially induced corrosion test. *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 128. Article 104445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104445>.
10. Khan H. A., Castel A., Khan M. S. H., Mahmood A. H. Durability of calcium aluminate and sulphate resistant Portland cement based mortars in aggressive sewer environment and sulphuric acid. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 124. Article 105852. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105852>.
11. Khan H. A., Castel A., Khan M. S. H. Corrosion investigation of fly ash based geopolymer mortar in

- mortar in natural sewer environment and sulphuric acid solution. *Corrosion Science*, 168, Article 108586. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108586>.
12. Jian, Y., Liu, D., Cao, K., & Tang, Y. (2023). Compartmentalized quantitative analysis of concrete sulfate-damaged area based on ultrasonic velocity. *Materials*, 16(7), Article 2658. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16072658>.
13. Liu, D., Gong, C., Tang, Y., Jian, Y., Cao, K., & Chen, H. (2022). Evaluation of corrosion damage in sulfate-attacked concrete by CT, ultrasonic pulse velocity testing and AHP methods. *Sensors*, 22(8), Article 3037. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22083037>.
14. Song, H., Fan, S., Zhang, S., & Gong, M. (2023). Strength deterioration prediction of pervious concrete in sulfate and dry-wet cycle environments utilizing ultrasonic velocity. *PLOS One*, 18(6), Article e0286948. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286948>.
15. Wu, L., Hu, C., & Liu, W. V. (2020). Forecasting the deterioration of cement-based mixtures under sulfuric acid attack using support vector regression based on Bayesian optimization. *SN Applied Sciences*, 2, Article 1970. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03778-9>.
16. Cao, K., Liu, D., Tang, Y., Zhang, W., Jian, Y., & Chen, S. (2024). Failure node prediction study of in-service tunnel concrete for sulfate attack by PSO-LSTM based on Markov correction. *Case Studies in Construction Materials*, 20, Article e03153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03153>.
17. Xiao, J., Zeng, H., Huang, H., Liu, L., Li, L., Yuan, B., & Zhong, Z. (2024). Experimental investigation on the influence of strength grade on the surface fractal dimension of concrete under sulfuric acid attack. *Buildings*, 14(3), Article 713. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14030713>.
18. Zhang, W., & Song, Z. (2023). Theoretical model and experimental research on mortar corrosion by sulfuric acid in laminar flow. *Tehnički Vjesnik*, 30(6), 1929–1934. DOI: <https://doi.org/10.17559/TV-20230713000800>.
19. Wu, Q., Ma, Q., & Huang, X. (2021). Mechanical properties and damage evolution of concrete materials considering sulfate attack. *Materials*, 14(9), Article 2343. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14092343>.
20. Qiao, D., Matsushita, T., Maenaka, T., & Shimamoto, R. (2021). Long-term performance assessment of concrete exposed to acid attack and external sulfate attack. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 19(7), 796–810. DOI: <https://doi.org/10.3151/jact.19.796>.
21. Chang, H. B., & Choi, Y. C. (2020). Accelerated performance evaluation of repair mortars for concrete natural sewer environment and sulphuric acid solution. *Corrosion Science*. 2020. Vol. 168. Article 108586. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108586>.
12. Jian Y., Liu D., Cao K., Tang Y. Compartmentalized quantitative analysis of concrete sulfate-damaged area based on ultrasonic velocity. *Materials*. 2023. Vol. 16, No. 7. Article 2658. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16072658>.
13. Liu D., Gong C., Tang Y. та ін. Evaluation of corrosion damage in sulfate-attacked concrete by CT, ultrasonic pulse velocity testing and AHP methods. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 8. Article 3037. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22083037>.
14. Song H., Fan S., Zhang S., Gong M. Strength deterioration prediction of pervious concrete in sulfate and dry-wet cycle environments utilizing ultrasonic velocity. *PLOS One*. 2023. Vol. 18, No. 6. Article e0286948. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286948>.
15. Wu L., Hu C., Liu W. V. Forecasting the deterioration of cement-based mixtures under sulfuric acid attack using support vector regression based on Bayesian optimization. *SN Applied Sciences*. 2020. Vol. 2. Article 1970. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03778-9>.
16. Cao K., Liu D., Tang Y. et al. Failure node prediction study of in-service tunnel concrete for sulfate attack by PSO-LSTM based on Markov correction. *Case Studies in Construction Materials*. 2024. Vol. 20. Article e03153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03153>.
17. Xiao J., Zeng H., Huang H. et al. Experimental investigation on the influence of strength grade on the surface fractal dimension of concrete under sulfuric acid attack. *Buildings*. 2024. Vol. 14, No. 3. Article 713. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14030713>.
18. Zhang W., Song Z. Theoretical model and experimental research on mortar corrosion by sulfuric acid in laminar flow. *Tehnički Vjesnik*. 2023. Vol. 30, No. 6. P. 1929–1934. DOI: <https://doi.org/10.17559/TV-20230713000800>.
19. Wu Q., Ma Q., Huang X. Mechanical properties and damage evolution of concrete materials considering sulfate attack. *Materials*. 2021. Vol. 14, No. 9. Article 2343. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14092343>.
20. Qiao D., Matsushita T., Maenaka T., Shimamoto R. Long-term performance assessment of concrete exposed to acid attack and external sulfate attack. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2021. Vol. 19, No. 7. P. 796–810. DOI: <https://doi.org/10.3151/jact.19.796>.
21. Chang H. B., Choi Y. C. Accelerated performance evaluation of repair mortars for

- sewer pipes subjected to sulfuric acid attack. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 13635–13645. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.124>.
22. O’Connell, M., McNally, C., & Richardson, M. G. (2010). Biochemical attack on concrete in wastewater applications: A state of the art review. *Cement and Concrete Composites*, 32(7), 479–485. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.05.001>.
23. Xiao, J., Huang, H., Zeng, H., Liu, L., Li, L., Jiang, H., Zhong, Z., & Chen, A. (2023). Experimental study on the sulfuric acid corrosion resistance of PHC used for pipe pile and NSC used in engineering. *Buildings*, 13(7), Article 1596. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13071596>.
24. Xiao, J., Qu, W., Jiang, H., & Dong, W. (2020). Three-dimensional fractal characterization of concrete surface subjected to sulfuric acid attacks. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 39, Article 57. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10921-020-00689-y>.
25. Zhang, C., Li, J., Yu, M., Lu, Y., & Liu, S. (2024). Mechanism and performance control methods of sulfate attack on concrete: A review. *Materials*, 17(19), Article 4836. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17194836>.
26. Sun, Y., You, M., Yin, X., Hou, D., Li, J., & Zhou, X. (2025). Study on the micro-mechanism of corrosion deterioration of concrete under sulfate attack environment. *Materials*, 18(12), Article 2904. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18122904>.
27. Carvalho, Y. M., Pinheiro, B. S., Pinto, V. G., & Brandt, E. M. F. (2020). Performance of blended concrete with supplementary cementitious materials under sulfuric acid – A systematic review. *Matéria*, 27(2), Article e13211. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620220002.1311>.
28. Gu, L., Bennett, T., & Visintin, P. (2019). Sulphuric acid exposure of conventional concrete and alkali-activated concrete: Assessment of test methodologies. *Construction and Building Materials*, 197, 681–692. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.166>.
29. Irico, S., De Meyst, L., Qvaeschning, D., Alonso, M. C., Villar, K., & De Belie, N. (2020). Severe sulfuric acid attack on self-compacting concrete with granulometrically optimized blast-furnace slag – Comparison of different test methods. *Materials*, 13(6), Article 1431. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13061431>.
30. Baz, B., Aouad, G., Kleib, J., Bulteel, D., & Remond, S. (2021). Durability assessment and microstructural analysis of 3D printed concrete exposed to sulfuric acid environments. *Construction and Building Materials*, 278, Article 121477. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.121477>.
- concrete sewer pipes subjected to sulfuric acid attack. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9, No. 6. P. 13635–13645. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.124>.
22. O’Connell M., McNally C., Richardson M. G. Biochemical attack on concrete in wastewater applications: A state of the art review. *Cement and Concrete Composites*. 2010. Vol. 32, No. 7. P. 479–485. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.05.001>.
23. Xiao J., Huang H., Zeng H. et al. Experimental study on the sulfuric acid corrosion resistance of PHC used for pipe pile and NSC used in engineering. *Buildings*. 2023. Vol. 13, No. 7. Article 1596. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13071596>.
24. Xiao J., Qu W., Jiang H., Dong W. Three-dimensional fractal characterization of concrete surface subjected to sulfuric acid attacks. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2020. Vol. 39. Article 57. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10921-020-00689-y>.
25. Zhang C., Li J., Yu M. et al. Mechanism and performance control methods of sulfate attack on concrete: A review. *Materials*. 2024. Vol. 17, No. 19. Article 4836. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17194836>.
26. Sun Y., You M., Yin X. et al. Study on the micro-mechanism of corrosion deterioration of concrete under sulfate attack environment. *Materials*. 2025. Vol. 18, No. 12. Article 2904. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18122904>.
27. Carvalho Y. M., Pinheiro B. S., Pinto V. G., Brandt E. M. F. Performance of blended concrete with supplementary cementitious materials under sulfuric acid – a systematic review. *Matéria*. 2020. Vol. 27, No. 2. Article e13211. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620220002.1311>.
28. Gu L., Bennett T., Visintin P. Sulphuric acid exposure of conventional concrete and alkali-activated concrete: Assessment of test methodologies. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 197. P. 681–692. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.166>.
29. Irico S., De Meyst L., Qvaeschning D. та ін. Severe sulfuric acid attack on self-compacting concrete with granulometrically optimized blast-furnace slag-comparison of different test methods. *Materials*. 2020. Vol. 13, No. 6. Article 1431. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13061431>.
30. Baz B., Aouad G., Kleib J. et al. Durability assessment and microstructural analysis of 3D printed concrete exposed to sulfuric acid environments. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 278. Article 121477. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.121477>.

- Building Materials*, 290, Article 123220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123220>.
31. Luimes, R. A., Rooyackers, F. A. M., Suiker, A. S. J., Clemens, F. H. L. R., & Bosco, E. (2024). A novel approach for the lifetime prediction and structural health monitoring of concrete sewer systems exposed to biogenic sulphide corrosion. *Cement and Concrete Research*, 181, Article 107517. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107517>.
32. Sampaio, R., Bastos, A., & Ferreira, M. (2022). New sensors for monitoring pH and corrosion of embedded steel in mortars during sulfuric acid attack. *Sensors*, 22(14), Article 5356. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22145356>.
33. Fan, W., Zhuge, Y., Ma, X., Chow, C. W. K., Gorjian, N., Oh, J. A., & Duan, W. (2020). Durability of fibre-reinforced calcium aluminate cement (CAC)-ground granulated blast furnace slag (GGBFS) blended mortar after sulfuric acid attack. *Materials*, 13(17), Article 3822. <https://doi.org/10.3390/ma13173822>.
- Materials*. 2021. Vol. 290. Article 123220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123220>.
31. Luimes R. A., Rooyackers F. A. M., Suiker A. S. J. та ін. A novel approach for the lifetime prediction and structural health monitoring of concrete sewer systems exposed to biogenic sulphide corrosion. *Cement and Concrete Research*. 2024. Vol. 181. Article 107517. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107517>.
32. Sampaio R., Bastos A., Ferreira M. New sensors for monitoring pH and corrosion of embedded steel in mortars during sulfuric acid attack. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 14. Article 5356. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22145356>.
33. Fan W., Zhuge Y., Ma X. et al. Durability of fibre-reinforced calcium aluminate cement (CAC)-ground granulated blast furnace slag (GGBFS) blended mortar after sulfuric acid attack. *Materials*. 2020. Vol. 13, No. 17. Article 3832. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13173822>.

**HRINCHENKO VITALII**

PhD student,  
Department of Chemical Technology of Composite  
Materials, National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine  
<https://orcid.org/0009-0006-2965-5096>  
Researcher ID: QAX-7683-2026  
E-mail: [v.hrinchenko@kpi.ua](mailto:v.hrinchenko@kpi.ua)

**SIKORSKYI OLEKSII**

Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer,  
Department of Chemical Technology of Composite  
Materials, National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-3730-2016>  
Scopus Author ID: 57205190051  
Researcher ID: J-5174-2017  
E-mail: [o.sikorsky@kpi.ua](mailto:o.sikorsky@kpi.ua)

**Vitalii HRINCHENKO, Oleksii SIKORSKYI**

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine

**LIMITATIONS OF CURRENT SULFATE RESISTANCE TESTING METHODS  
FOR EVALUATING CONCRETE DURABILITY: A SYSTEMATIC REVIEW**

**Purpose.** The purpose of this work is to identify and systematize the main limitations of current sulfate resistance testing methods for concrete that reduce their reliability in predicting the actual behaviour of structures under aggressive service environments, as well as to analyse promising directions for overcoming these limitations, taking into account Ukraine's needs in the recovery and modernization of wastewater infrastructure.

**Methodology.** The study is based on a systematic review and qualitative synthesis of data derived from primary experimental studies, narrative and systematic reviews, and regulatory documents. Source screening was conducted using the Scopus and Web of Science databases according to criteria focused on sulfate resistance testing methods, identification of protocol limitations, and examination of the correlation between laboratory and field results. The practical part was developed on the basis of data from the National Report on the Quality of Drinking Water and the State of Drinking Water Supply and Wastewater Disposal in Ukraine in 2024.

**Findings.** Six main categories of limitations have been identified: inability to adequately reproduce real service conditions, imperfection of existing standards, time-scale constraints, insufficient reliability of measurement indicators and approaches, non-representativeness of specimens and materials, and inconsistency between chemical and biogenic testing methods. It has been established that accelerated tests using highly concentrated solutions can alter the mechanisms of degradation rather than merely accelerate them. The current standards ASTM C1012, SIA 262/1, CSA A3004-C8, DIN 19573 and GB/T 50082 differ

*substantially in testing conditions and evaluation criteria, while the European Committee CEN does not have a unified protocol.*

**Originality.** *It consists in the systematic alignment of methodological limitations of international sulfate resistance testing protocols with the applied requirements for evaluating concrete durability under conditions of infrastructure crisis in Ukraine, which has made it possible to substantiate priority directions for adapting these protocols to the needs of the wastewater sector recovery.*

**Practical value.** *The proposed systematization of limitations can be used in the formulation of technical specifications for laboratory testing of concrete intended for the repair and reconstruction of 417 wastewater treatment facilities and more than 14.7 thousand kilometres of dilapidated centralized sewerage networks, as well as for the harmonization of national regulatory documents with the requirements of the Law of Ukraine No. 2887-IX and the directives of the European Union.*

**Keywords:** *concrete; concrete sulfate resistance; testing methods; biogenic corrosion; sewer networks; accelerated testing; wastewater treatment facilities.*