

УДК 666.972.16

**ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ СПОСОБІВ ВІДНОВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНИХ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ У ТРАНСПОРТНОМУ БУДІВНИЦТВІ**

Канд. техн. наук О. Ю. Дорошенко

**EXPERIENCE IN THE APPLICATION OF METHODS OF RESTORATION
OF DAMAGED REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN TRANSPORT
CONSTRUCTION**

PhD (Tech.) A. Doroshenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.209.2024.314452>



Анотація. Дані свідчать про те, що самовідновлення бетону може бути досягнуто шляхом введення в бетонну матрицю бактерій. Незважаючи на те, що деякі дослідники проводили експерименти з різними видами бактерій, ще потрібно точно ідентифікувати ідеальне поєднання таких чинників, як види бактерій, типи мінерального субстрату, типи матеріалів-носіїв і кількість кожного з цих компонентів для якісного прориву в розв'язанні проблеми отримання самовідновлювальних бетонів і залізобетонних конструкцій. У статті

наведено результати дослідження з розроблення технології отримання матеріалів із біодобавками, вивчення процесу усунення тріщин у бетоні та встановлення фізико-технічних властивостей бетонів, модифікованих мікробіологічною добавкою, і відновлених матеріалів.

Ключові слова: бактерії, самовідновлювальні бетони, мікробіологічні добавки, тріщини, фізико-технічні властивості бетонів.

Abstract. Evidence suggests that concrete self-healing can be achieved by introducing bacteria into the concrete matrix. Despite the fact that a number of researchers have conducted experiments with different types of bacteria, the ideal combination of factors such as bacterial species, types of mineral substrate, types of carrier materials and the amount of each of these components has yet to be identified to make a qualitative breakthrough in solving the problem of self-healing concrete and reinforced concrete structures.

The paper presents the results of a study on the development of a technology for obtaining materials with bio-additives, the study of the process of crack repair in concrete, and the establishment of physical and technical properties of concrete modified with a microbiological additive and restored materials.

The article analyses the processes of structure formation, physical and mechanical properties of concrete and other cement composites, ways to improve them, degradation processes, damage and defects that reduce the durability of reinforced concrete structures, as well as methods of their repair and restoration. Based on the analysis of existing approaches to the creation of concrete using biotechnology and self-healing processes of defective reinforced concrete structures, theoretical prerequisites for the development of technology for the creation of concrete modified with microbiological additives and self-healing structures are developed.

It is concluded that it is potentially possible to heal cracks in concrete under the control of bacteria as a result of mineral sludge formation. However, some areas of this concept require further development. It is necessary to clarify how effectively the deposition of minerals produced by bacteria seals large cracks, i.e. how much the permeability of cracked concrete is reduced to prevent corrosion of embedded reinforcement and thus increase the service life of the building material. In addition, it is necessary to select bacterial species that remain viable when introduced into the concrete matrix for at least the expected service life of the structure. Despite the fact that no qualitative breakthrough has yet been achieved in the field of concrete self-healing, this is a very promising area of research.

Keywords: bacteria, self-healing concrete, microbiological additives, cracks, physical and technical properties of concrete.

Вступ. Відомо, що тварини і рослини мають природну здатність за відносно короткий проміжок часу самостійно заліковувати невеликі тілесні ушкодження без будь-якого зовнішнього впливу. Те саме можна спостерігати в старих конструкціях – тріщини невеликих розмірів самоусуваються в результаті повторної кристалізації кальциту. Досвід показує, що під час експлуатації залізобетонні конструкції мають і значні пошкодження як тріщини великих розмірів, які не можуть самозаліковуватися без активізації процесів, що призводить до погіршення їхньої якості

та скорочення очікуваного терміну експлуатації.

Дані свідчать про те, що самовідновлення бетону може бути досягнуто шляхом введення в бетонну матрицю бактерій. Незважаючи на те, що деякі дослідники проводили експерименти з різними видами бактерій, ще потрібно точно ідентифікувати ідеальне поєднання таких чинників, як види бактерій, типи мінерального субстрату, типи матеріалів-носіїв і кількість кожного з цих компонентів для якісного прориву в розв'язанні проблеми

отримання самовідновлювальних бетонів і залізобетонних конструкцій.

У статті наведено результати дослідження з розроблення технології отримання матеріалів з біодобавками, вивчення процесу усунення тріщин у бетоні та встановлення фізико-технічних властивостей бетонів, модифікованих мікробіологічною добавкою, і відновлених матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченню технології отримання бетонів, модифікованих мікробіологічною добавкою, і відновлення міцності й довговічності самовідновлювальних залізобетонних конструкцій при заліковуванні тріщин присвячені роботи E. Voguet, V. Ramarkrichnan, Chun Xiang Qian, P. Ehogh, W. De Muynck, H. M. Jonkers, J. Park, V. Achal, Jing Xu, S. R. Ghosh, H. M. Jonkers, V. S. Whiffin, K. Van Tittelboom, M. D. Hager, J. Y. Wang, Hua Xia, L. Zong, C. Edvardsen, C. A. Clear, T. Nishiwoki, H. Mihashi та ін.

Ученими було висловлено припущення, що іммобілізовані в бетонній матриці бактеріальні спори, які перебувають у стані спокою, але життєздатні, стають метаболічно активними, щойно через новоутворені тріщини проникає волога. Потім ці тріщини затягуються внаслідок знаходження кальциту, утвореного в результаті життєдіяльності мікроорганізмів.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є дослідження самовідновлювальних бетонів, модифікованих мікробіологічною добавкою.

Завдання дослідження проаналізувати процеси структуроутворення, фізико-механічні властивості бетонів та інших цементних композитів, способи їх поліпшення, деградаційні процеси, пошкодження та дефекти, що знижують довговічність залізобетонних конструкцій, а також способи їхнього ремонту і відновлення. На основі аналізу сучасних підходів до створення бетонів за допомогою біотехнологій і процесів самовідновлення

дефектних залізобетонних конструкцій розробити теоретичні передумови з розроблення технології створення бетонів, модифікованих мікробіологічною добавкою і самовідновлювальних конструкцій.

Основна частина дослідження. Із постійним удосконаленням наявних матеріалів, що зумовлюють істотний технічний та економічний ефект завдяки унікальному поєднанню властивостей, намітилися тенденції створення нових матеріалів, здатних до активної взаємодії із зовнішніми чинниками.

Такі матеріали отримали назву «інтелектуальних». Вони здатні «відчувати» свій фізичний стан, зовнішні впливи та особливо реагувати на ці «відчуття», тобто здійснювати самодіагностику щодо виникнення та розвитку дефекту, його усунення і стабілізування свого стану у критичних зонах. Внаслідок різноманіття властивостей «інтелектуальних» матеріалів їх застосування дасть змогу контролювати і прогнозувати стан різних конструкцій і споруд у потрібний момент і навіть на важкодоступних ділянках, значно підвищити ресурс систем і їхню надійність [14, 31].

Були розроблені різні хімічні методи створення самовідновлювального бетону [5, 22, 29, 30]. За деякими пропозиціями, відновлювальний засіб помістили всередину мікрокапсул. При розтріскуванні бетону вони руйнувалися, вивільняючи відновлювальний засіб, який заповнював тріщини. Випробувано безліч відновлювальних засобів, як-от епоксидні смоли, ціанакрилати, розчини діоксиду кремнію в лузі [31] тощо. Виявлено, що матеріал може відновити свою механічну міцність майже настільки, як і в разі цементування тріщин вручну. Такі засоби мають деякі загальні якості: низьку в'язкість для забезпечення ширшої області ремонту і відмінного зчеплення між поверхнями тріщини, а також достатню капілярну силу для переміщення відновлювального засобу вглиб тріщини.

Однією з проривних технологій у сфері отримання ефективних будівельних матеріалів є біотехнології, засновані на використанні мікроорганізмів. На високому науково-технологічному рівні розроблено матеріали, одержувані за допомогою мікробіологічного синтезу. До них насамперед належать деревні пластики, клеї, біосуперпластифікатори і пінобетони [2, 34].

Багато дослідників вивчали застосування кальциту, що виробляють бактерії, для підвищення терміну експлуатації цементних споруд і відновлення будівель [9, 11, 12, 35] за допомогою усунення тріщин, підвищення міцності бетону, зниження проникності, зменшення водопоглинання.

Більш ефективну ліквідацію тріщин за рахунок застосування мікроорганізмів порівняно з традиційними способами ремонту автори робіт [8, 28, 32, 33] проводили з використанням ґрунтових бактерій *Bacillus pasteurii*, іммобілізованих і захищених у поліуретановому полімері, вапні, тонкому кремнеземельному порошку і золі-виносі. У результаті міцність на стиск і жорсткість відновленого бетону значно підвищилися. При цьому з'ясувалося, що міцність на стиск була приблизно на 5 % вищою, ніж у зразках без іммобілізації мікроорганізмів у пустотах матеріалу.

Результати дослідження [7] підтвердили позитивну перспективу використання виробленого бактеріями *Bacillus sphaericus* карбонату для усунення тріщин у бетоні. Дослідники повідомили про повну герметизацію штучно створених тріщин завширшки 0,3 мм і завглибшки 10 мм і зазначили, що проникність бетону була значно меншою, ніж під тріщинами, які були зашпаровані цементним розчином. У роботі [6] зазначено, що при обробці кальцитом мікробіологічного походження міцність на стиск оброблених зразків може бути відновлена до 84 %.

Були проведені випробування з метою вивчення доцільності застосування

біологічного бетону для підвищення міцності на стиск бетону і цементного розчину [1, 2, 10, 13, 17, 33]. Під час експериментальних досліджень у бетонну суміш вводили різні мікроорганізми.

У роботі [30] вивчали включення до цементного розчину бактерій *Bacillus pasteurii* у різних концентраціях. На 7-й і 28-й день спостерігали значне збільшення міцності на стиск бетонів, зумовлене наявністю в матриці достатньої кількості органічних речовин завдяки бактеріальній біомасі. У дослідженні [26] вивчали вплив нового типу термофільних анаеробних мікроорганізмів *Shewanella* на міцність на стиск зразків цементного розчину. На 28-й день відзначено підвищення цього показника на 25...30 %.

Автори роботи [27] вибрали для введення в зразки бетону бактерій *Bacillus pseudofirmus* і *Bacillus cohnii* і виявили 10 % збільшення міцності на стиск. Водночас у роботі [20] вивчали бактерії *Sporosarcina pasteurii*, введені в кубики цементного розчину, і відзначили збільшення міцності на стиск на 17 %. 22 % її збільшення спостерігали дослідники [25] в результаті обробки зразків цементного розчину мікроорганізмами *Arthrobacter crystallopoietes*. У цьому дослідженні з чотирьох обраних видів мікроорганізмів, а саме *Sporosarcina soli*, *Bacillus massiliensis*, *Arthrobacter crystallopoietes* і *Lysinibacillus fusiformis*, найбільше підвищення міцності зумовили бактерії *Arthrobacter crystallopoietes*.

Тим часом при змішуванні бактерій *Bacillus* зі зразком цементного розчину відзначено збільшення міцності на стиск на 36 % [33]. У роботі [26] вивчали вплив бактерій *Sporosarcina pasteurii* на міцність на стиск цементного бетону з добавкою золи-виносу. Повідомляли про максимальне збільшення цього параметра на 22 %. У цьому дослідженні в цемент вводили добавки золи-виносу (у кількості 10, 20 і 30 % за масою) і три різні концентрації бактеріальних клітин (103, 105 і

107 клітин/мл). Збільшення міцності на стиск відбувалося за рахунок осадження кальциту на поверхні бактеріальних клітин і осідання цих клітин у порах.

Автори роботи [15] зосередилися на багаторівневому дослідженні механічних властивостей бетону з додаванням відновлювального засобу на основі бактерій, що не мають уролітичної активності. Під час дослідження на макромасштабні механічні виміри для оцінювання механічних властивостей бетону в процесі його руйнування та відновлення проведено випробування на вигин із прикладанням зосередженого навантаження в чотирьох точках і вимірювання швидкості ультразвукового імпульсу. Крім того, визначали нанотвердість вдавлюванням кульки як наномеханічне випробування для дослідження наномеханічних властивостей осаджених мінералів і сили їхнього зчеплення з бетоном. Експериментальні результати показали, що на ефективність затягування тріщин сильний вплив має джерело кальцію. Випробування на визначення швидкості ультразвукового імпульсу і вигин із застосуванням навантаження в чотирьох точках показали, що максимальний ефект загоєння (тобто максимальний коефіцієнт відновлення міцності під час вигину і максимальний модуль пружності) було отримано за умови двокомпонентного самовідновлення в присутності глутамату кальцію.

Згинальні характеристики ЕСС-матеріалів із додаванням мікроорганізмів оцінено в роботі [24]. Після розтріскування та загоєння тріщин суміші з додаванням біологічного відновлювального засобу демонстрували дещо краще відновлення міцності за вигину та згинальної здатності порівняно з контрольними сумішами, що не включали відновлювальний засіб біологічного походження.

Важливою характеристикою, яка впливає на тривалість терміну експлуатації бетону, є проникність. У бетон із високою

проникністю просочуються вода і забруднювальні речовини, які впливають на структурну цілісність і довговічність бетону. Тому бетон із низькою проникністю має більш тривалий термін експлуатації [33].

Оскільки осадження бактерій відбувається переважно на поверхні, то відкладення кальциту можна розглядати як утворення ізолюючого шару [3]. Проникність можна вивчати за результатами випробувань на карбонізацію, оскільки відомо, що зниження газопроникності внаслідок обробки поверхні призводить до підвищення стійкості до карбонізації та проникнення хлоридів. У дослідженні [3] отримано дані про підвищення стійкості бетону до дії луку, циклів заморожування-відтавання, усадки під час висихання та зменшення проникності, що спостерігається при додаванні бактеріальних клітин.

У роботі [17] наведено результати вивчення залежності проникності бетону від утворення осаду карбонату кальцію шляхом внесення мікроорганізмів *Bacillus sphaericus* у кубики з цементного розчину. При цьому спостерігали значне зниження проникності порівняно з необробленими зразками цементного розчину.

У дослідженні [33] відзначено значне зниження водопроникності кубиків цементного розчину, оброблених бактеріями *Sporosarcina pasteurii*. Вважають, що нижча проникність кубиків з інкорпорованими бактеріями може бути зумовлена наявністю щільнішого міжфазного кордону, утвореного між заповнювачем і бетонною матрицею внаслідок осадження кальциту.

У роботі [36] дослідники вивчали вплив на водопроникність бактерій *Bacillus pasteurii* і спостерігали аналогічний результат. Крім того, порівняно з необробленим зразком кубики цементного розчину з інкорпорованими бактеріями *Bacillus* продемонстрували шестикратне зниження поглинання води [33].

У дослідженні [26] спостерігали восьмикратне зменшення проникності хлорид-іонів під час вивчення впливу бактерій *Sporosarcina pasteurii* на цементний бетон із добавкою золи-виносу. Вважають, що таке зниження проникності може бути пов'язане з наявністю в бетоні осажденного кальциту. Крім того, у роботі [4] повідомлено про зниження водопроникності на 68 %, коли для дослідження процесів самовідновлення у зразок цементного розчину помістили капсульовані в гідрогель спори *Bacillus sphaericus*.

У роботі [26] спостерігали чотирикратне скорочення поглинання води бетоном із добавкою золи-виносу, у який ввели бактерії. Було помічено, що при введенні бактерій у бетон із добавкою золи-виносу його водопоглинальна здатність зменшується зі збільшенням концентрації бактерій. Максимальне зниження показника спостерігали за концентрації бактерій 105 клітин/мл для всіх зразків бетону з добавкою золи-виносу. У цьому дослідженні наявність бактерій призвела до значного зниження поглинання води порівняно з контрольними зразками. Осадження шару карбонату кальцію на поверхні та всередині пор бетонних зразків зумовило зменшення водопоглинання.

Дані роботи [16] показали, що значення коефіцієнта сорбції для 28-денних біологічно оброблених зразків бетонного розчину з додаванням тонкого кремнеземного порошку і без нього було на 42...48 % і 57...64 % нижчим, ніж відповідне значення для необроблених зразків. Отримані результати свідчать, що у випадку звичайних зразків навіть за значного зниження сорбційної здатності бактеріальна обробка зразків із тріщинами не зменшувала величину цього параметра до того самого значення, що й у зразків без тріщин. Значення коефіцієнтів сорбції зразків із додаванням тонкого кремнеземного порошку, підданих бактеріальній обробці, були дуже близькі до

значень коефіцієнтів сорбції біологічно оброблених зразків без тріщин.

Однією з основних причин втрати несучої здатності або стійкості будівельних конструкцій вважають корозію сталі в бетоні. Проникність і корозія взаємопов'язані, оскільки проникність зумовлює проникнення в бетон хлорид-іонів і домішок, що спричиняє корозію сталі, а отже, впливає на тривалість терміну служби бетону. Зазначено, що осадження карбонату кальцію сприяло зниженню проникності через закупорювання шляхів проникнення домішок у бетонну матрицю [27]. У дослідженні [18] спостерігали значне зниження корозії сталеві арматури завдяки зменшенню просочування води і хлорид-іонів у результаті осадження кальциту, виробленого мікроорганізмами *Sporosarcina pasteurii* і *Bacillus*.

За хімічною природою базових речовин, що використовують у процесі самовідновлення, їх можна віднести до двох різних категорій – залежні та автономні. Залежним матеріалам, які беруть участь у загоєнні тріщин, для стимулювання процесу потрібен зовнішній вплив – нагрівання або освітлення, тоді як автономним матеріалам будь-які зовнішні стимули не потрібні. Наявність пошкодження вже є сигналом для запуску процесу самовідновлення [18, 37].

Інша класифікація – поділ самовідновлювальних матеріалів на зовнішні та внутрішні. По-перше, процес загоєння ґрунтований на застосуванні зовнішніх регенерувальних компонентів, таких як мікро- або нанокапсули [37]. Для надання матеріалам здатності самовідновлення в їхню матрицю навмисно вбудовують капсули, і з пошкодженням вміст цих капсул діє як рухома фаза. На відміну від цього, для внутрішніх самовідновлювальних матеріалів ніяких особливих регенерувальних речовин не потрібно. Зазвичай протікає процес внутрішнього самовідновлення. Однак він не завжди можливий [37].

До нинішнього часу в більшості випадків бактеріальний бетон застосовували для обробки для ліквідації наслідків тріщиноутворення. Це не можна вважати суто «самовідновленням», оскільки його застосовували після розтріскування [7, 8, 28, 32, 33]. У цих дослідженнях виявили ефективне закупорювання тріщин і відновлення механічної міцності бетону, зумовлене наявністю в матриці достатньої кількості органічних речовин завдяки присутності мікробної біомаси. Проведено лише кілька досліджень істинного самовідновлення бактеріального бетону [21, 26]. Також здійснено незначну кількість експериментів із самовідновлення ЕСС-матеріалів із додаванням мікроорганізмів [24]. Їхні результати свідчать про те, що іммобілізовані бактерії є проміжною ланкою при осадженні мінералів. Встановлено, що бактерії та деякі види необхідних поживних речовин не мають

негативного впливу на характеристики міцності бетону [2, 19].

Висновки. Зроблено висновок про потенційну можливість заліковування тріщин у бетоні під контролем бактерій у результаті утворення мінерального осаду. Однак деякі напрями цієї концепції потребують подальшого розроблення. Слід уточнити, наскільки ефективно осадження вироблених бактеріями мінералів ущільнює тріщини великих розмірів, тобто наскільки знижується проникність потрісканого бетону, щоб запобігти корозії вбудованої арматури і в такий спосіб збільшити термін експлуатації будівельного матеріалу. Крім того, необхідно вибрати види бактерій, які залишаються життєздатними при впровадженні в бетонну матрицю принаймні протягом передбачуваного терміну служби конструкції. Незважаючи на те, що досі не досягнуто якісного прориву в галузі самовідновлення бетону, це дуже перспективний напрям досліджень.

Список використаних джерел

1. Achal V., Mukherjee A., Reddy M. S. Microbial concrete: A way to enhance the durability of concrete buildings. *Journal of Materials in Civil engineering*. 2011. Vol. 23. № 6. P. 730–734.
2. Achal V. Microbial remediation of defects in building materials and structures: PhD thesis. India: Thapar University, Patiala, 2010. P. 1–263.
3. Ahmad S., Sal-lam Y. S., Al-Hawas M. A. Effects of Key Factors on Compressive and Tensile Strengths of Concrete Exposed to Elevated Temperatures. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2014. 39(6). P. 4507–4513.
4. Knorre H., Krumbein W. Bacterial calcification. *Microbial Sediments*. Springer-Verlag, R. E. Riding, S. M. Awramik (eds.). Berlin, Germany, 2000. P. 25–31.
5. Bang S. S., Galinat J. K., Ramakrishnan V. Calcite precipitation induced by polyurethane immobilized *Sporosarcina pasteurii*. *Enzyme and Microbial Technology*. 2001. Vol. 28, № 4. P. 404–409.
6. Biomediated precipitation of calcium carbonate metastable phases in hypogean environments: A short review / S. Sanchez-Moral, J. C. Canaveras, L. Laiz [et. al.]. *Geomicrobiology Journal*. 2003. Vol. 20(5). P. 491–500.
7. Cihan M. T., Güner A., Yüzer N. Response surfaces for compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. № 40. P. 763–774.
8. De Infusies en de Ontdekking der Bacterien, Jaarboek van de Koninklijke Akademie v. Wetenschappen / M. Beijerinck. Muller, Amsterdam, 1913.

9. Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials / W. De Muynck, D. Debrouwer, N. DeBelie, W. Verstraete. *Cement and Concrete Research*. 2008. Vol. 38, № 7. P. 1005–1014.
10. De Muynck W., Kathelijn C., Belie N. De. Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22(5). P. 875–885.
11. Edvardsen C. Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Materials Journal*. 1999. Vol. 96, № 7. P. 448–454.
12. Feldman R. F. The effect of sand cement ration and silica fume on the microstructure of mortars. *Cement and Concrete Research*. 1986. Vol. 16, № 3. P. 31–39.
13. Ghosh S. K. (ed.) *Self-healing materials: fundamentals, design strategies, and applications*, Wiley WCH, Weinheim. 2009. P. 183–218.
14. Guadalupe Sierra-Beltran M., Jonkers H. M., Schlangen E. Characterization of sustainable biobased mortar for concrete repair. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 67, № 9. P. 344–352.
15. Trends in Participation in Higher Education by Gender / N. Guppy, S. Gilbert, J. Curtis et al. (eds). *Social Inequality in Canada: Patterns, Problems, Policies*. Toronto: Prentice Hall, 1988.
16. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete / H. M. Jonkers, A. Thijssen, G. Muyzer [et al.]. *Ecological engineering*. 2010. Vol. 3, № 62. P. 230–235.
17. Jonkers H. M. At two component bacteria based self-healing concrete. *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II*. 2009. № 3. P. 215–220.
18. Jonkers H. M., Schlangen E. Development of a bacteria-based self-healing concrete. *Tailor Made Concrete Structures- New Solution for Society*. 2008. P. 425–430.
19. Jonkers H. M. Self-healing concrete: a biological approach. *Self-healing Materials: An Alternative Approach to Centuries of Materials Science, Springer – 2007*. 2007. P. 195–204.
20. Joseph C., Jefferson A., Canoni M. Issues relating to the autonomic healing of cementitious materials. *1st international conference on self-healing materials: Noordwijk aan Zee, the Netherlands*. 2007. P. 53.
21. Knorre H. V., Krumbein W. E. Bacterial calcification. *Microbial Sediments, Springer*. 2000. P. 25–31.
22. Lotfy A., Hossain K. M. A., Lachemi M. Lightweight Self-consolidating Concrete with Expanded Shale Aggregates: Modelling and Optimization. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2015. № 9(2). P. 185–206.
23. Microbial mediated deterioration of reinforced concrete structures / S. M. Wei, S. M. Sanchez, D. Trejo, C. Gillis. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 2010. Vol. (8). P. 748–754.
24. Nabil B., Aissa A., Aguida B. I. Effectiveness of different solutions to reduce plastic shrinkage in hot climate concreting. *2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*. 2010. P. 853–863.
25. Broad spectrum pro-quorum-sensing molecules as inhibitors of virulence in vibrios / W. L. Ng, L. Perez, J. Cong, M. F. Semmelhack, B. L. Bassler. *PLoS Pathog* 8. 2012.
26. O'Reilly K. T., Crawford R. L. Degradation of pentachlorophenol by polyurethane immobilized *Flavobacterium* cells. 1989. Vol. 55(9). P. 2113–2118.
27. Patil A. A. Effect of curing condition on strength of geopolymer concrete. *Advances in Concrete Construction*. 2014. Vol. 2, № 1. P. 29–37.
28. Forage nonstructural carbohydrates and nutritive value as affected by time of cutting and species / S. Pelletier, G. F. Tremblay, G. Belanger [et al.]. 2010. Vol. 102 (5). P. 1388–1398.

29. Tai C. Y., Chen F. B. Polymorphism of CaCO₃ precipitated in a constant-composition environment. *AIChE Journal*. 1998. Vol. 44 (8). P. 1790–1798.
30. Fortina M. G., Manachini P. L. Production in seawater of thermostable alkaline protease by a halotolerant strain of *Bacillus licheniformis*. *Biotechnol. Lett.* 1998. Vol. 20. P. 565–568.
31. Raijiwala D. B., Patil H. S. High Performance Green Concrete. *Civil Engineering and Architecture*. 2013. Vol. 1 (1). P. 1–6.
32. Ramachandran S. K., Ramakrishnan V., Bang S. S. Remediation of concrete using microorganisms. *ACI Materials Journal*. 2001. Vol. 98, № 1. P. 3–9.
33. Ramakrishnan V., Bang S. S., Deo K. S. A novel technique for repairing cracks in high performance concrete using bacteria. *Proc. international conference on high performance high strength concrete, Perth, Australia*. 1998. P. 597–618.
34. Sahmaran M., Li V. C. Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes flyash. *Cement and Concrete Research*. 2009. Vol. 39. № 11. P. 1033–1043.
35. Silica fume in concrete. *ACI materials journal*. 1987. P. 158–166.
36. Wang X., Ruckenstein E. A novel support for the immobilization of lipase and the effects of the details of its preparation on the hydrolysis of triacyl glycerides. 1993. Vol. 7, № 2. P. 117–122.
37. Growth propagation of yeast in linear arrays of microfluidic chambers over man generations / L. Wang, J. Liu, X. Li [et al.]. *Biomicrofluidics*. 2011. Vol. 5, № 4. P. 44118–44119.

Дорошенко Олександра Юріївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії та колійного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій. ORCID iD: 0000-0002-6724-0709. Тел.: (067)758-57-33. E-mail: sane4kador@gmail.com.

Doroshenko Aleksandra, PhD (Tech). Associate Professor, department of railway track and track economy State University of Infrastructure and Technology. ORCID iD: 0000-0002-6724-0709. Tel.: (067)758-57-33. E-mail: sane4kador@gmail.com.

Статтю прийнято 29.09.2024 р.