

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН КОРОЗІЇ ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ ПРИ АВАРІЙНОМУ РУЙНУВАННІ КОНСТРУКЦІЙ ПРОГОНОВОЇ БУДОВИ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО МОСТА

*Онищенко А. М.*, доктор технічних наук, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1040-4530

*Коваленко В. В.*, кандидат технічних наук, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, м. Київ, Україна, vkovdp@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1196-7730

*Рикутцев О. І.*, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, rykovtsevoleksii@gmail.com, orcid.org/0009-0001-1715-6058

*Ковальчук В. В.*, доктор технічних наук, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, kovalchuk.diit@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4350-1756

## INVESTIGATION OF THE CAUSES OF CEMENT STONE CORROSION IN THE EMERGENCY DESTRUCTION OF THE DECK STRUCTURE OF A REINFORCED CONCRETE BRIDGE

*Onyshchenko A.M.*, Doctor of Technical Sciences, National Transport University, Kyiv, Ukraine, onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1040-4530

*Kovalenko V.V.*, Candidate of Technical Sciences, Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, vkovdp@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1196-7730

*Rykovtsev O.I.*, Postgraduate student, Department of Bridges and Tunnels National Transport University, Kyiv, Ukraine, rykovtsevoleksii@gmail.com, orcid.org/0009-0001-1715-6058

*Kovalchuk V.V.*, Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Railway Transport Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, kovalchuk.diit@gmail.com, orcid.org/0000-0003-4350-1756

**Постановка проблеми.** Корозія бетону є актуальною проблемою у всіх країнах світу. Особливу увагу процесам корозії цементного каменю приділяють для умов експлуатації бетонних труб в якості обсадних для добування газу та нафти. Вплив на бетон високих тисків газу CO<sub>2</sub>, нафти при високих температурах призводить до прискореної корозії цементного каменю та втраті його механічних властивостей [1–2].

Однак процес карбонізації бетону, який працює на відкритому повітрі відбувається із швидкістю приблизно 20 мм у 25 років. Зниження міцності бетону в приповерхневому шарі відбувається за рахунок впливу карбонільної кислоти, яка знижує лужність цементного каменю. Дана загально відома проблема виникає виключно в приповерхневих ділянках бетонного масиву. Більш небезпечним видом корозії є лужно-кремнієвокисла корозія цементного каменю, яка відбувається у всьому масиві бетону залізобетонних виробів, конструкцій, споруд.

Проблема лужно-кремнієвокислої корозії бетону в Україні досі не контролюється державними організаціями так, наприклад, за умов введення в 2010 р. ДСТУ Б В. 2.6-145:2010 [3], вимоги цього стандарту не вносяться в проекти будівництва стратегічних інфраструктурних об'єктів, які будуються за кошти державного бюджету, та споруд комунального загального і промислового користування.

Передчасне руйнування бетону після 1–10 років експлуатації в Україні доволі часте явище при тому, що термін служби бетону складає від 50 до 100 років. Вигода від впровадження зазначеного стандарту в проектну документацію усіх будівельних об'єктів є очевидною і дотримання норм цього національного стандарту буде сприяти попередженню передчасних руйнувань бетону. Необхідно також зауважити, що традиційні стандартизовані методи досліджень характеристик сировинних матеріалів дозволяють отримати результати аналізів не раніше ніж за тиждень від їх початку, а швидкість переробки цементу та заповнювачів на бетонних заводах і вузлах значно перевищує можливості лабораторних досліджень. Таким чином, неможливість вчасно отримати результати досліджень викликає проблему забезпечення довговічності бетону конструкцій.

Відновлення економіки України потребує значних закордонних інвестицій, в тому числі приватних інвесторів, які будуть стежити за ефективністю власних інвестицій. Таким чином, застосування

стандарту ДСТУ Б В. 2.6-145: 010 [3] сприятиме ефективному витрачання коштів в будівництві, суттєво підвищить інвестиційну привабливість та ефективність розбудови України.

**Аналіз останніх публікацій по проблемі.** Довговічність бетону, як основного матеріалу для будівництва інфраструктурних споруд є об'єктом досліджень багатьох вітчизняних авторів, а саме: Пшінька О.М., Рунова Р.Ф., Коваленка В.В., Плугіна А. А. та інші, що відображено у науково-дослідних роботах [4] – [9].

Мостові конструкції витримують значні динамічні навантаження в корозійно-активному середовищі у комплексі із температурними коливаннями. Такі складні умови експлуатації вимагають строгої технологічної дисципліни під час виготовлення та використання мостових конструкцій.

Згідно чинного законодавства в сфері будівництва бетон конструкцій повинен відповідати таким стандартам: ДСТУ: ДСТУ ISO 3696:2003 [10] (ISO 3696:1987, IDT) ДСТУ Б EN12620:2013 [11] ДСТУ Б В.2.6-145:2010 [3]; ДСТУ Б В.2.7-32-95 [12]; ДСТУ Б В.2.7-46:2010 [13]; ДСТУ Б В.2.7-71 - 98 [14]; ДСТУ Б В.2.7-75-98 [15]; ДСТУ Б В.2.7-210:2010 [16]; ДСТУ Б EN 197-1:2015 [17]; ДСТУ 9183:22 [18]; ДСТУ EN 197-2:2023 [19]; ДСТУ 8858:2019 [20]. Вміст хлор-іонів у цементобетонах дорожніх не повинен бути більше ніж: 0,2 % від маси цементу для цементобетонів з ненапруженою арматурою та 0,1 % від маси цементу для цементобетонів з напруженою арматурою. Інші не менш важливі вимоги до сировинних матеріалів та бетону наведено в стандартах [21] – [29].

Із проведеного аналізу наукових робіт [1–9] встановлено, що задачі досліджень технічного стану прогонових будов мостів та виявлення причин аварійного руйнування мостових конструкцій є актуальними та своєчасними.

**Формулювання мети дослідження (постановка завдання).** Метою досліджень є виявлення причин аварійного руйнування мостових конструкцій через р. Либідь. Для досягнення зазначеної мети необхідно виконати наступні завдання:

- провести обстеження конструкцій прогонової будови моста;
- провести експериментальні дослідження із визначення причин аварійного руйнування прогонової будови моста із використанням мікроструктури та хімічного складу в зразках пошкодженого корозією та цілого бетону конструкцій прогонової будови мосту та опор мосту;
- визначити мікроструктуру та хімічний склад бетону на границі цементний камінь – пісочна частка.

**Виклад основних результатів та їх обґрунтування.** Проведемо дослідження причин аварійного руйнування мосту через ріку Либідь по Повітрофлотському проспекту в м. Київ. Міст збудовано в 1954 р. з реконструкцією в 1982 р., більшість елементів конструкцій мосту знаходяться в незадовільному стані. Присутнє корозійне розтріскування бетону та руйнування окремих частин бетонного масиву.

Конструкції мостової будови нерівномірно пошкоджені та причини пошкоджень відрізняються: від лужно-кремнієвокислої реакції до прискореного руйнування під дією хімічних реагентів.

Загальний вид пошкоджень наведено на рис. 1. Як видно з рис. 1, а, б на поверхні бетону опор і прогонової будови оголені арматурні прутки. За нормативними документами шар бетону над арматурою не повинен бути меншим за 20 мм задля забезпечення захисту арматури від корозії. Також наявна корозія бетону між ребрами мостової балки. Шар бетону над арматурою зруйновано та спостерігається оголена арматурна решітка.

Незахищена арматурна решітка активно кородує та разом із бетоном втрачає проектну міцність. На поверхню бетону виділяється білява кремнієва рідина, що свідчить про активність процесу лужно-кремнієвокислої реакції між цементним каменем та піском у складі бетону.

Огляд нижньої прогонової частини мосту показав наявність подальшого осипання бетонних брил, нещільного прилягання бетону до арматурної решітки (рис. 1, в).

Макроструктурний аналіз бетону прогонової частини мостових конструкцій показав, що бетонна суміш під час будівництва була якісно укладена в конструкціях мосту. Непошкоджені частини конструкції мають гладку поверхню, яка свідчить про відсутність зовнішніх ознак процесів корозійного розтріскування та відносного збереження міцності основних несучих конструкцій (надалі мікроструктурний аналіз має показати наскільки бетон є дефектним та можливий термін його подальшої експлуатації).



а б в  
Рисунок 1 – Загальний вигляд пошкоджень мосту Повітрофлотського проспекту через р. Либідь в м. Київ  
Figure 1 – General view of the damage to the Povitroflotskyi Avenue bridge across the Lybid River in Kyiv

Наявність активної корозії балок мостових говорить про необхідність їх заміни. Руйнування огорожень і частини пішохідного проходу мосту відбулося з однієї сторони мосту. Це доводить, що подібна аварійна ситуація відбулася із зовнішніх причин (нанесення, або задування вітром речовини агресивної до цементного каменю бетону).

Таким чином, усі наведені на рис. 1 дефекти прогонових будов моста є результатом дії різних зовнішніх та внутрішніх факторів на бетон споруди.

Аварійне руйнування бетону мостових конструкцій ініційоване різними типами корозії бетону. Переважне значення має лужно-кремнієвокисла корозія, швидкість якої прискорюється активними реагентами. Макроструктурний аналіз виявив наявність виділень кремнієвої рідини із зони прискореного руйнування бетону. Для визначення подальшої активності процесу корозії необхідно встановити гіпсові маяки на тріщини на опорах мосту.

**Результат експериментальних досліджень із визначення причин аварійного руйнування прогонової будови моста із дослідженням мікроструктури та хімічного складу.** Більш глибоке вивчення причин аварійного руйнування проводили за допомогою дослідження мікроструктури та хімічного складу в зразках пошкодженого корозією та цілого бетону конструкцій прогонової будови моста та опор моста.

Аналіз хімічного складу цементу, окремих піщаних часток, цементного каменю та продуктів лужно-кремнієвокислої реакції в бетоні прогонової частини моста і опор проводили із використанням методів скануючої мікроскопії та мікрорентгеноспектрального аналізу. Результати кількісного аналізу вмісту хімічних елементів, та особливо співвідношень концентрацій хімічних елементів в структурних складових на плоских поверхнях речовин та кристалах (наприклад, кремнієвого гелю, на розколі пісочних часток, масиві цементного каменю) у високому вакуумі з напругою, яка прискорює – 10 кВ, дозволяють виявляти наявність та кількість хімічних елементів з точністю до 0,01 відсотка мас. Що є на рівні, або перевищує точність діючих стандартних методів аналізу. При цьому необхідно відмітити швидкість проведення вказаних випробувань, що дозволяє їх віднести до експрес-методів визначення характеристик матеріалів. Експрес методику важливо поєднувати із застосуванням традиційних методів аналізу, які прописані в відповідних діючих стандартах України.

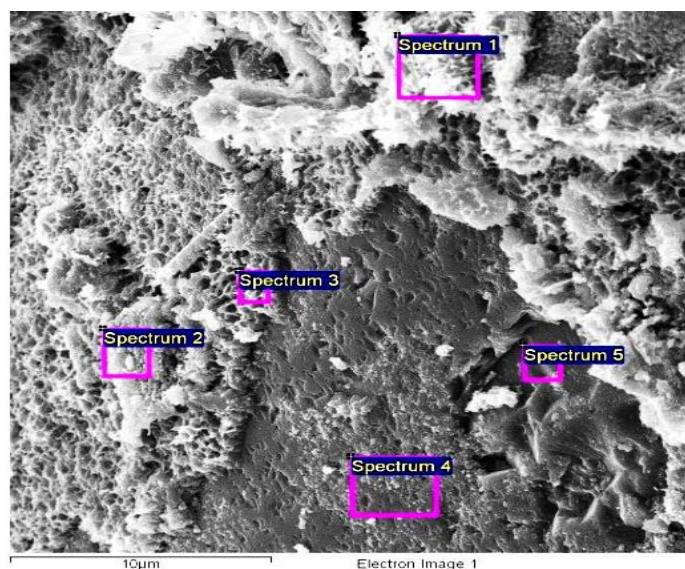
У дослідженні проведено послідовне сканування структурних складових бетону за допомогою енергодисперсійного аналізатора з Оксфордськими програмами кількісного аналізу хімічних елементів. Максимальна точність отриманих результатів мікрорентгеноспектрального аналізу базується на застосованому методі, при якому дослідження зразків проводиться у глибокому вакуумі до  $10^{-5}$  Па.

Від відповідності характеристик цементу нормам стандарту ДСТУ Б.В. 2.7-46:2010 залежить структуроутворення цементного каменя, морфологія кристалів, фізико-механічні характеристики та довговічність залізобетонних виробів. При підвищеній лужності цементу (приведений коефіцієнт лужності ( $\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{ K}_2\text{O}$ ) більший за 0,6 % (мас.)) в процесі гідратації та під час експлуатації мостових конструкцій відбувається реакція хімічної взаємодії луг цементу з кислотними заповнювачами, які

за стандартами не повинні містити більше ніж 50 ммоль/л діоксиду кремнію розчинного в лугах (аморфного кремнезему) ДСТУ Б В.2.6-145:2010.

За державним стандартом ДСТУ Б.В 2.7-46:2010 в портландцементі співвідношення за масою кальцій оксиду до силіцій діоксиду повинно становити не менше ніж 2,0, а масова частка магній оксиду не повинна перевищувати 5 % (мас.), вміст сірки у перерахунку на SO<sub>3</sub> не повинен перевищувати 3,5 % (мас.), але бути більше ніж 1 % (мас.), глини не більше 1,2 % (мас.), вміст хлорид-іонів не повинен перевищувати 0,1 % (мас.).

Середній коефіцієнт приведеної лужності цементу непошкодженого бетону першого зразка становить 1,15 % (мас.), що у 1,9 рази перевищує нормативний показник, визначений ДСТУ Б В.2.6-145:2010 (ГОСТ 31384:2008, NEQ). Результати досліджень наведено на рис. 2.



| Spectrum   | In stats. | C     | O     | F    | Na   | Al   | Si    | S    | Ca    | Total  |
|------------|-----------|-------|-------|------|------|------|-------|------|-------|--------|
| Spectrum 1 | Yes       | 16.40 | 52.93 | 1.21 | 0.20 | 0.81 | 5.94  | 0.46 | 22.04 | 100.00 |
| Spectrum 2 | Yes       | 16.96 | 54.47 | 1.37 | 0.00 | 0.54 | 4.10  | 0.38 | 22.17 | 100.00 |
| Spectrum 3 | Yes       | 18.40 | 52.36 | 0.98 | 0.14 |      | 7.86  | 0.41 | 19.85 | 100.00 |
| Spectrum 4 | Yes       | 11.03 | 57.92 |      | 0.00 |      | 29.27 |      | 1.77  | 100.00 |
| Spectrum 5 | Yes       | 9.54  | 57.13 |      | 0.00 |      | 31.95 |      | 1.38  | 100.00 |

Рисунок 2 – Мікроструктура та хімічний склад бетону, % (мас.), на границі цементний камінь–пісочна частка

Figure 2 – Microstructure and chemical composition of concrete, % (wt.), at the cement stone–sand particle boundary.

За розрахунками співвідношення оксиду кальцію до оксиду кремнію в першому дослідженому зразку складає 2,55, що задовольняє вимогам стандарту (рис. 2). Трикальцієвий алюмінат у складі цементу не повинен перевищувати 8 % за масою. У бетоні кількість трикальцієвого алюмінату складає 5,85 % (мас.). Кількість оксиду магнію дорівнює 0,17 % (мас.), що набагато менше граничної кількості у 5 % (мас.). Кількість глини дорівнює 6,6 % (мас.), що не задовольняє вимогам стандарту.

Середнє значення концентрації оксиду сірки складає 4,93 % (мас.). Має місце локальне підвищення концентрації її оксиду до 6,15 % (мас.), що значно перевищує нормативний показник у 3,5 % (мас.). Крім того, значний відсоток вуглецю в структурі цементного каменю усіх зразків свідчить про його карбонізацію, що додатково знижує механічні характеристики бетону в конструкціях мосту. Але точність визначення концентрації вуглецю є дуже низькою і тому ретельний аналіз ступеню карбонізації не проводили. Із загальної практики використання бетону швидкість карбонізації складає 20 мм за 25 років. Для захисту бетону від карбонізації застосовують спеціальні добавки.

Другий зразок бетону був відібраний на ділянці пошкодженого бетону, що знаходився біля пішохідної частини мосту. Для зазначеного бетону характерно нормативне співвідношення оксидів кальцію та кремнію  $k=7,02$ , вміст оксиду сірки SO<sub>3</sub>- 0,62 % (мас.), глини 1,02 % (мас.), коефіцієнт приведеної лужності цементу 0,18 % (мас.), відсутність з'єднань магнію, але має місце наявність іонів

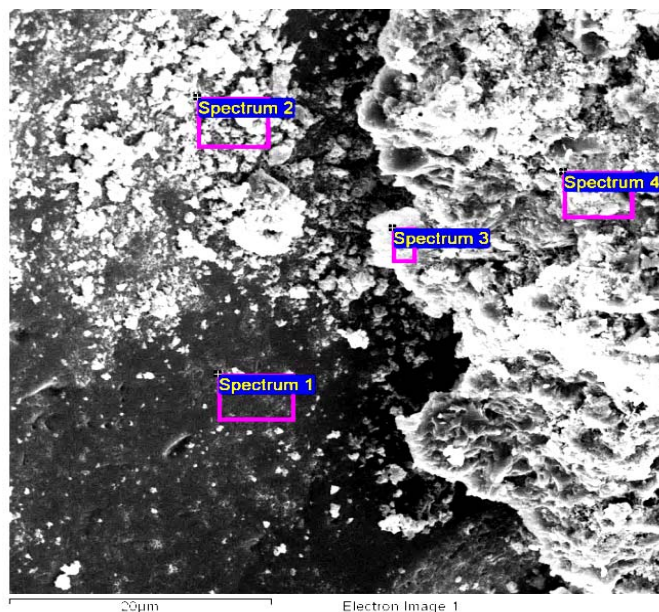


фтору в кількості 0,71 % (мас.). Цей хімічний елемент називають отрутою для бетонів, бо він сприяє розм'якшенню цементного каменю та мінеральних гелів всередині бетону, разом із кремнієм та натрієм утворює гелеподібні і стрічкоподібні кристалічні структури, що руйнують бетон з середини протягом року.

Наступний зразок відібраний із тріщини на опорній конструкції мосту. Цементний камінь зазначеної ділянки бетону має нормативні показники співвідношення оксидів кальцію та кремнію 3,73, концентрація оксиду магнію дорівнює 0,28 % (мас.), концентрація трикальцієвого алюмінату дорівнює 1,47 % (мас.), оксиду сірки  $\text{SO}_3$  0,21 % (мас.), глини – 0,75 % (мас.).

Середня приведена лужність бетону складає 1,7 %, що в 2,8 рази перевищує норму, до того ж в реакційній зоні приведена лужність складає 26,29 % (мас.), що в 43,82 рази перевищує нормативний показник і свідчить про активність корозійних процесів та неможливість їх припинення. До того ж бетон має середню концентрацію фтору 0,86 % (мас.) зі збільшенням концентрації в реакційній зоні до 1,04 % (мас.). Також він містить хлор із середньою концентрацією 0,13 % (мас.) і в реакційній зоні 0,21 % (мас.) (рис. 2). Усі зазначені галогени сприяють прискоренню процесу корозійного руйнування. І кінцевий термін втрати конструкції міцності не перевищує 1 рік від початку дії активаторів корозії – галогенів

На рис. 3 наведено межу пісочної частки з цементним каменем із кремнієвим гелем посередині, який демонструє процес корозії з продукуванням продукту реакції – мінеральним гелем.



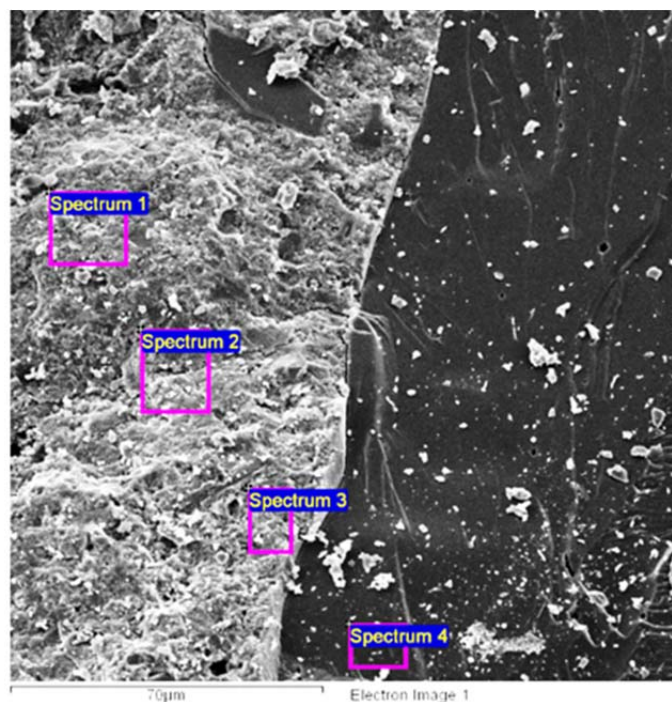
| Spectrum   | In stats. | C     | O     | F    | Na   | Al   | Si    | S    | Cl   | K    | Ca    | Fe   | Total |
|------------|-----------|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|-------|
| Spectrum 1 | Yes       | 10.10 | 56.46 |      |      |      | 32.51 |      |      |      | 0.92  |      | 100.0 |
| Spectrum 2 | Yes       | 15.99 | 53.63 | 1.48 | 0.23 | 1.04 | 23.49 |      | 0.47 | 0.52 | 3.15  |      | 100.0 |
| Spectrum 3 | Yes       | 16.09 | 54.76 | 1.08 | 0.99 | 6.00 | 10.29 | 0.33 | 1.47 | 0.85 | 8.13  |      | 100.0 |
| Spectrum 4 | Yes       | 17.17 | 55.37 | 1.02 | 0.44 | 1.65 | 4.94  | 0.30 | 0.64 |      | 16.41 | 2.07 | 100.0 |

Рисунок 3 – Мікроструктура та хімічний склад бетону, % (мас.) , на границі цементний камінь/пісочна частка.

Figure 3 – Microstructure and chemical composition of concrete, % (wt.), at the cement stone/sand particle boundary.

У зоні тріщини підвищена кількість глини 10,96 % (мас.) та трикальцієвого алюмінату 8,5 % (мас.), а також значна концентрація галогенів фтору і хлору 1,19 % (мас.) і 0,86 % (мас.) відповідно.

Із зони непошкодженого бетону отримано наступний зразок для досліджень (рис. 4). Бетон має задовільне співвідношення оксидів кальцію та кремнію, що дорівнює  $k=2,69$ . Кількість триоксиду сірки дорівнює 1,22 % (мас), трикальцієвий алюмінат (6,11 % (мас.)) і кількість глини (1,2 % (мас.)) не виходять за рамки дозволених стандартом концентрацій.



| Spectrum   | In stats. | C     | O     | F    | Na   | Al   | Si    | S    | Cl   | K    | Ca    | Total |
|------------|-----------|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|-------|
| Spectrum 1 | Yes       | 11.28 | 42.31 |      | 1.01 | 1.39 | 6.77  | 0.53 | 0.00 | 1.69 | 35.02 | 100.0 |
| Spectrum 2 | Yes       | 13.40 | 49.06 |      | 1.64 | 0.96 | 9.76  | 0.44 | 0.00 |      | 24.73 | 100.0 |
| Spectrum 3 | Yes       | 10.03 | 47.36 | 0.86 | 1.64 | 1.02 | 5.92  | 0.74 | 0.00 |      | 32.43 | 100.0 |
| Spectrum 4 | Yes       | 12.30 | 40.35 |      |      |      | 47.09 | 0.00 | 0.26 |      |       | 100.0 |

Рисунок 4 – Хімічний склад та мікроструктура структурних складових бетону на непошкодженій ділянці, % (мас.)

Figure 4 – Chemical composition and microstructure of structural components of concrete in the undamaged area, % (wt.)

Середня приведена лужність цементу перевищує нормативні показники в 10,88 раз і становить 6,53 % (мас.). Зазначені обставини у поєднанні з підвищеним вмістом галогенів в реакційній зоні (фтору – 0,86 % (мас.), та хлору 0,26 % (мас.) дозволяють робити висновок про подальше інтенсивне корозійне руйнування бетону до втрати міцності протягом до одного року (рис.4).

Із проведених досліджень встановлено, що для попередження передчасного руйнування бетону інфраструктурних об'єктів необхідно: проводити моніторинг якості бетону існуючих конструкцій та під час будівництва нових об'єктів за експрес-методикою мікроструктурного аналізу за вимогами ДСТУ Б В. 2.6-145: 010. При цьому для наочного спостереження за швидкістю корозійних процесів пропонуємо встановити гіпсовий маяк на тріщину на опорній колонні мосту з боку тротуару.

З метою усунення активного впливу галогенів на структурні перетворення в бетоні, що експлуатується пропонуємо дослідити можливість використання менш агресивних речовин, що менше впливатимуть на корозійні процеси у бетоні і арматурі залізобетонних споруд, але ефективно будуть сприяти очищенню тротуарів та проїзної частини доріг від снігу.

**Висновок:** За результатами дослідження цементного каменю в конструкціях прогонової будови та опорної аркової колони мосту через р. Либідь по проспекту Повітряних сил України в м. Київ можна зробити наступні висновки:

1. Проведені в роботі дослідження показали невідповідність за реакційною спроможністю цементу та піску досліджуваного бетону вимогам стандартів України.

2. Прогонові та опорні конструкції мосту в яких проходить лужно-кислотна реакція необхідно міняти на нові. Так як, будь-які ремонтні матеріали, що можуть бути нанесені на масив бетону будуть розриватися з причини реструктуризаційних процесів в середині бетону.

3. Наявність підвищеної приведеної лужності цементу призводить до лужно-кислої реакції в бетоні, що експлуатується. Чим більш реакційно спроможний хімічний елемент знаходиться

в бетоні, тим активніше проходить лужно-кремнієвокисла реакція, яка руйнує бетон з середини. Агресивними реагентами – каталізаторами лужно-кремнієвокислої реакції в бетоні є речовини з вмістом галогенів.

4. Швидкість реакції корозії цементного каменю залежить від наявності агресивних реагентів всередині бетону.

5. У випадку дослідженого бетону необхідно відмітити, що поєднання підвищених концентрацій фтору та хлору сприяє максимальній швидкості зазначеної реакції. Реакція проходить з утворенням нових фаз із вторинного еtringіту, гелевих прошарків, які згодом кристалізуються. Питомий об'єм кристалів перевищує наявний внутрішній об'єм пустот і сприяє утворенню мікро- та згодом макротріщин в бетонній матриці, по-перше, по границях заповнювач–цементний камінь.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Zhang Y. Study on the corrosion change law and prediction model of cement stone in oil wells with CO<sub>2</sub> corrosion in ultra-high temperature sour gas wells Yihan Zhang, Mingbiao Xu, Jianjian Song, Chunli Wang, Xiaoliang Wang, Bahati Adnan Hamad Construction and building materials, Vol. 323, March 14, 2022, 125879 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125879>.

2. Cheng X.W. Study of interface structure during unidirectional corrosion of oil well cement in H<sub>2</sub>S based on computed tomography technology XiaoWei Cheng, KaiYuan Mei, ZaoYuan Li, Xingguo Zhang, XiaoYang Guo Research in Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 55/Issue 41, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.6b02162>.

3. ДСТУ Б В. 2.6-145:2010 Конструкції будинків і споруд. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. Загальні технічні вимоги (ГОСТ 31384-2008, (NEQ).

4. Пшінько О.М., Рунова Р.Ф. Рунова Р.Ф., Руденко І.І., Троян В.В. Роль добавок у зменшенні клінкерної складової під час виробництва товарних бетонних сумішей // М-ли 10-й Міжн. науково-практ. конф. «Дні сучасного бетону». – Запоріжжя: «Планета», 2008. – С. 45 – 59.

5. Рунова Р.Ф., Руденко І. І., Троян В. В. Аналіз факторів, що визначають властивості товарних бетонних сумішей // Матеріали 1-ї Міжнародної науково-практичної конференції «ТОВАРНИЙ БЕТОН — НОВІ МОЖЛИВОСТІ У БУДІВЕЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ». – Харків 2008. – С. 16-43.

6. Шейніч Л. О. Сучасні уявлення про корозію цементного каменю в бетоні під дією води Шейніч Л.О. Ю Колесник, К.К. Пушкарьова, Л.О. Шейніч Автошляховик України 2012 – № 4. – С. 33-37.

7. Рибкін В. В. Дослідження фізико-хімічних властивостей дрібних заповнювачів для виробництва залізобетонних шпал [Текст]/ В.В. Рибкін, В.В.Коваленко, Ю.Л.Заяць, П.О.Пшінько, В.П.Лисняк, Л.О.Яришкіна, С.В.Васильєва// Вісник ДНУЗТ Вип. 40 – Д.:В-во ДНУЗТ – С. 140-145.

8. Рибкін В. В. Дослідження експлуатаційної стійкості залізобетонних шпал та основні технологічні прийоми її покращення [Текст] / В.В.Рибкін, В.В.Коваленко, Ю.Л.Заяць, П.О.Пшінько, С.В.Коваленко, В.О.Яковлев // Будівництво України. № 4 – К. – 2011 – С.19-23.

9. Рибкін В. В. Деякі аспекти технологічних прийомів виробництва та контролю експлуатаційного ресурсу залізобетонних шпал в Україні та світі[Текст] / В.В.Рибкін, В.В.Коваленко, Ю.Л.Заяць, П.О. Пшінько, С.В.Коваленко, В.О.Яковлев // Залізничний транспорт України № 3/4 – К. – 2012 – С. 76-81.

10. ДСТУ ISO 3696:2003 Вода для застосування в лабораторіях. Вимоги та методи перевіряння; (ISO 3696:1987, IDT).

11. ДСТУ Б EN12620:2013 Заповнювачі для бетону (EN12620:2002+A1:2008, IDT).

12. ДСТУ Б В.2.7-32-95 Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови.

13. ДСТУ Б В.2.7-46:2010 Будівельні матеріали. Цементи загально-будівельного призначення. Технічні умови.

14. ДСТУ Б В.2.7-71 -98 (ГОСТ 8269.0-97) Будівельні матеріали. Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань.

15. ДСТУ Б В.2.7-75-98 Будівельні матеріали. Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови.

16. ДСТУ Б В.2.7-210:2010 Будівельні матеріали. Пісок із відсівів дроблення вивержених гірських порід для будівельних робіт. Технічні умови.

17. ДСТУ Б EN 197-1:2015 Цементи. Частина 1 Склад, технічні умови та критерії відповідності для звичайних цементів (EN 197-1:2011, IDT).
18. ДСТУ 9183:22 Цементи. Загальні технічні умови.
19. ДСТУ EN 197-2:2023 (EN 197-2:2020, IDT) Цемент Частина 2 Оцінювання та перевірка стабільності експлуатаційних характеристик.
20. ДСТУ 8858:2019 Суміші цементобетонні дорожні та цементобетон дорожній Технічні умови.
21. ДСТУ Б В.2.7-273:2011 Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови (ГОСТ 23732-79, MOD);
22. ДСТУ Б В.2.6-209:2016 Конструкції будинків і споруд. Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови.
23. ДСТУ Б.А 1.1-55-94 Природні піски для виробництва будівельних матеріалів Терміни та визначення.
24. ДСТУ Б В.2.7-171:2008 Будівельні матеріали. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови.
25. ДСТУ Б В.2.7-176:2008 Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови.
26. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками.
27. ДСТУ Б В.2.7-224:2009 Бетони. Правила контролю міцності.
28. ДСТУ-Н Б А.1.1-83:2008 Система стандартизації та нормування у будівництві. Настанова. Керівний документ В щодо визначення контролю виробництва на підприємстві в технічних умовах на будівельні вироби.
29. ДСТУ-Н Б В.2.7-175:2008 Настанова щодо застосування хімічних добавок у бетонах і будівельних розчинах.

## REFERENCES

1. Klyuchnik, S. V., & Marochka, V. V. (2014). Review of Strengthening and Repair Options for Superstructure Deck Beams. Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice, (5), 35–40.
1. Zhang Y. Study on the corrosion change law and prediction model of cement stone in oil wells with CO<sub>2</sub> corrosion in ultra-high temperature sour gas wells Yihan Zhang, Mingbiao Xu, Jianjian Song, Chunli Wang, Xiaoliang Wang, Bahati Adnan Hamad Construction and building materials, Vol. 323, March 14, 2022, 125879 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125879>.
2. Cheng X.W. Study of interface structure during unidirectional corrosion of oil well cement in H<sub>2</sub>S based on computed tomography technology XiaoWei Cheng, KaiYuan Mei, ZaoYuan Li, Xingguo Zhang, XiaoYang Guo Research in Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 55/Issue 41, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.6b02162>.
3. DSTU B V. 2.6-145:2010 Konstruktsiyi budynkiv i sporud. Zakhyst betonnykh i zalizobetonnykh konstruktsiy vid koroziyi. Zahalni tekhnichni vymohy (HOST 31384-2008, (NEQ).
4. Pshinko O.M., Runova R.F. Runova R.F., Rudenko Y.Y., Troyan V.V. Rol dobavok v umensheny klynkernoy sostavlyayushchey pry proyvodstve tovarnykh betonnykh smesey// Mat. 10-y Mezhd. nauchno-prakt. konf. «Dny sovremennoho betona». – Zaporozhe: «Planeta», 2008. – s. 45 – 59.
5. Runova R.F., Rudenko Y.Y., Troyan V.V. Analiz faktorov, opredelyayushchykh svoystva tovarnykh betonnykh smesey// Materyaly 1-y Mezhdunarodnoy nauchno-praktycheskoy konferentsyy «TOVARNY BETON — NOVYE VOZMOZHNOSTY V STROYTEL'NYKH TEKHNOLOHYYAKH».- Kharkov 2008. – S.16-43.
6. Sheynich L.O. Suchasni uyavlennya pro koroziyu tsementnoho kamenyu v betoni pid diyeyu vody Sheynich L.O. Yu Kolesnyk, KK Pushkarova, LO Sheynych Avtoshlyakhovyk Ukrayiny 2012 № 4, s. 33-37.
7. Rybkin V.V. Doslidzhennya fizyko-khimichnykh vlastyivostey dribnykh zapovnyuvachiv dlya vyrobnytstva zalizobetonnykh shpal [Tekst]/ V.V. Rybkin, V.V.Kovalenko, Yu.L.Zayats, P.O.Pshinko, V.P.Lysnyak, L.O.Yaryshkina, S.V.Vasylyeva// Visnyk DNUZT Vyp. 40 – D.:V-vo DNUZT – S. 140-145.
8. Rybkin V.V. Doslidzhennya ekspluatatsynoyi stiykosti zalizobetonnykh shpal ta osnovni tekhnolohichni pryomy yiyi pokrashchennya [Tekst]/ V.V.Rybkin, V.V.Kovalenko, Yu.L.Zayats, P.O.Pshinko, S.V.Kovalenko, V.O.Yakovlyev//Budivnytstvo Ukrayiny. № 4 – K. – 2011 – S.19-23.



9. Rybkin V.V. Deyaki aspekty tekhnolohichnykh pryomiv vyrobnytstva ta kontrolyu ekspluatatsiynoho resursu zalizobetonnykh shpal v Ukraini ta sviti [Tekst] / V.V.Rybkin, V.V.Kovalenko, Yu.L.Zayats, P.O. Pshinko, S.V.Kovalenko, V.O.Yakovlyev // *Zaliznychnyy transport Ukrainy* № 3/4 – K. – 2012 – S. 76-81.
10. DSTU ISO 3696:2003 Voda dlya zastosuvannya v laboratoriyakh. Vymohy ta metody pereviryannya; (ISO 3696:1987, IDT).
11. DSTU B EN12620:2013 Zapovnyuvachi dlya betonu (EN12620:2002+A1:2008, IDT).
12. DSTU B V.2.7-32-95 Budivelni materialy. Pisok shchilnyy pryrodnyy dlya budivelnykh materialiv, vyrobiv, konstruktsiy i robit. Tekhnichni umovy.
13. DSTU B V.2.7-46:2010 Budivelni materialy. Tsementy zahalno-budivelnogo pryznachennya. Tekhnichni umovy.
14. DSTU B V.2.7-71 -98 (HOST 8269.0-97) Budivelni materialy. Shchebin i hraviy iz shchilnykh hirsykh porid i vidkhodiv promyslovoho vyrobnytstva dlya budivelnykh robit. Metody fizyko-mekhanichnykh vyprobuvan.
15. DSTU B V.2.7-75-98 Budivelni materialy. Shchebin i hraviy shchilni pryrodni dlya budivelnykh materialiv, vyrobiv, konstruktsiy ta robit. Tekhnichni umovy.
16. DSTU B V.2.7-210:2010 Budivelni materialy. Pisok iz vidsiviv droblennya vyverzhenykh hirsykh porid dlya budivelnykh robit. Tekhnichni umovy.
17. DSTU B EN 197-1:2015 Tsementy. Chstyna 1 Sklad, tekhnichni umovy ta kryteriyi vidpovidnosti dlya zvychaynykh tsementiv (EN 197-1:2011, IDT).
18. DSTU 9183:22 Tsementy. Zahalni tekhnichni umovy.
19. DSTU EN 197-2:2023 (EN 197-2:2020, IDT) Tsement Chastyna 2. Otsinyuvannya ta perevirka stabilnosti ekspluatatsiynykh kharakterystyk.
20. DSTU 8858:2019 Sumishi tsementobetonni dorozhni ta tsementobeton dorozhniy Tekhnichni umovy.
21. DSTU B V.2.7-273:2011 Voda dlya betoniv i rozchyniv. Tekhnichni umovy (HOST 23732-79, MOD).
22. DSTU B V.2.6-209:2016 Konstruktsiyi budynkiv i sporud. Shpaly zalizobetonni poperedno napruzheni dlya zaliznyts koliyi 1520 i 1435 mm. Tekhnichni umovy.
23. DSTU B.A 1.1-55-94 Pryrodni pisky dlya vyrobnytstva budivelnykh materialiv Terminy ta vyznachennya.
24. DSTU B V.2.7-171:2008 Budivelni materialy. Dobavky dlya betoniv i budivelnykh rozchyniv. Zahalni tekhnichni umovy.
25. DSTU B V.2.7-176:2008 Sumishi betonni ta beton. Zahalni tekhnichni umovy;.
26. DSTU B V.2.7-214:2009 Betony. Metody vyznachennya mitsnosti za kontrolnymy zrazkami.
27. DSTU B V.2.7-224:2009 Betony. Pravyla kontrolyu mitsnosti.
28. DSTU-N B A.1.1-83:2008 Systema standartyzatsiyi ta normuvannya u budivnytstvi. Nastanova. Kerivnyy dokument V shchodo vyznachennya kontrolyu vyrobnytstva na pidpryemstvi v tekhnichnykh umovakh na budivelni vyroby.
29. DSTU-N B V.2.7-175:2008 Nastanova shchodo zastosuvannya khimichnykh dobavok u betonakh i budivelnykh rozchynakh. Pshinko O.M., Runova R.F., Rudenko I.I., Troyan V.V. The role of additives in reducing the clinker component in the production of ready-mix concrete mixes // *Proc. of the 10th Int. scientific-practical. conf. "Days of modern concrete"*. – Zaporozhye: "Planeta", 2008. – pp. 45 – 59.

## РЕФЕРАТ

Онищенко А.М. Дослідження причин корозії цементного каменю при аварійному руйнуванні конструкцій прогонової будови залізобетонного моста / А.М. Онищенко, В.В. Коваленко, О.І. Риковець, В.В. Ковальчук // *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

Стаття присвячена проведенню досліджень стану конструкцій мосту Повітрофлотського проспекту через р. Либідь в м. Київ. Для цього застосовано методи вибіркової оцінки залізобетонних

конструкцій прогонової будови мосту, експрес-методики мікроструктурного, мікрорентгеноспектрального та фрактографічного аналізів..

Мета роботи – дослідження та виявлення причин аварійного руйнування мостових конструкцій через р. Либідь.

Методика – дослідження причин аварійного руйнування конструкцій прогонових будов моста проводили за допомогою дослідження мікроструктури та хімічного складу в зразках пошкоджених корозією та цілого бетону моста.

Результати – встановлено, що у складі бетону на границі заповнювачів піску та цементного каменю спостерігається наявність підвищеної кількості лужних металів та галогенів, яка перевищує вимоги державних стандартів у декілька разів. Середнє значення концентрації оксиду сірки складає 4,93 % (мас.). Має місце локальне підвищення концентрації її оксиду до 6,15 % (мас.), що значно перевищує нормативний показник у 3,5 % (мас.). Крім того, значний відсоток вуглецю в структурі цементного каменю усіх зразків свідчить про його карбонізацію, що додатково знижує механічні характеристики бетону в конструкціях мосту..

Висновки – для попередження випадків передчасного руйнування бетону мостів, шляхопроводів, автодоріг пропонуємо проводити моніторинг якості бетону існуючих конструкцій та під час будівництва нових об'єктів за експрес-методикою мікроструктурного аналізу, а також для наочного спостереження за швидкістю корозійних процесів слід встановити гіпсовий маяк на тріщину на опорній колонні моста з боку тротуару.

Для усунення активного впливу галогенів на структурні перетворення в бетоні, що експлуатується пропонуємо дослідити можливість використання менш агресивних речовин, які менше впливатимуть на корозійні процеси в бетоні і арматурі залізобетонних споруд, але ефективно будуть сприяти очищенню тротуарів та проїзної частини доріг від снігу.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ПРОГОНОВІ БУДОВИ МОСТІВ, БАЛКОВІ МОСТИ, БЕТОН, КОРОЗІЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ, МІКРОСТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ, МІКРОРЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ, ЛУЖНО-КРЕМНІЄВОКИСЛА РЕАКЦІЯ, АВАРІЙНЕ РУЙНУВАННЯ, ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ БЕТОНУ.

#### ABSTRACT

Onyshchenko A.M., Kovalenko V.V., Rykovtsev O.I., Kovalchuk V.V. Investigation of the Causes of Cement Stone Corrosion in the Event of Emergency Failure of the Superstructure of a Reinforced Concrete Bridge. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

The article is dedicated to the investigation of the condition of the bridge structures on Povitruflotsky Avenue over the Lybid River in Kyiv. To this end, methods of selective assessment of reinforced concrete superstructure elements were applied, along with express techniques for microstructural, micro-X-ray spectral, and fractographic analyses.

Objective – To investigate and identify the causes of the emergency failure of bridge structures over the Lybid River.

Methodology – The causes of the emergency failure of the bridge superstructure were studied by examining the microstructure and chemical composition of samples of concrete damaged by corrosion as well as intact concrete from the bridge.

Results – It was found that the concrete at the interface between sand aggregates and cement stone contains an elevated amount of alkali metals and halogens, exceeding national standard requirements several times. The average sulfur oxide concentration is 4.93% by mass. Localized increases in its concentration reach 6.15% by mass, significantly exceeding the regulatory limit of 3.5% by mass. In addition, a significant carbon content in the cement stone structure of all samples indicates its carbonation, which further reduces the mechanical properties of the concrete in the bridge structures.

Conclusions – To prevent premature concrete failure in bridges, overpasses, and highways, it is recommended to monitor the quality of concrete in existing structures and during the construction of new facilities using express microstructural analysis methods. For visual monitoring of corrosion rates, it is suggested to install a gypsum marker on cracks in the bridge support columns on the sidewalk side.

To mitigate the active influence of halogens on structural transformations in concrete in service, it is proposed to investigate the possibility of using less aggressive substances that will have a lower impact on corrosion processes in concrete and reinforcement of reinforced concrete structures while still effectively assisting in the removal of snow from sidewalks and roadways.

**KEYWORDS:** BRIDGE SUPERSTRUCTURES, BEAM BRIDGES, CONCRETE, CEMENT STONE CORROSION, MICROSTRUCTURAL ANALYSIS, MICRO-X-RAY SPECTRAL ANALYSIS, ALKALI-SILICA REACTION, EMERGENCY FAILURE, CONCRETE DURABILITY PREDICTION.

**АВТОРИ:**

Онищенко Артур Миколайович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Мости, тунелі і гідротехнічні споруди» Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, Україна, 01010, e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-1040-4530>

Коваленко Валентина Володимирівна, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства НАН України, вул. Омеляна Пріцака (Кржижановського), 3, Київ, Україна, 03142, e-mail: vkovdp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1196-7730>

Риковцев Олексій Ігорович, аспірант кафедри «Мости, тунелі і гідротехнічні споруди» Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, Україна, 01010, e-mail: rykovtsevoleksii@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0001-1715-6058>

Ковальчук Віталій Володимирович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри залізничного транспорту, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013, e-mail: kovalchuk.diit@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4350-1756>

**AUTHOR:**

Artur Onyshchenko, Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Bridges and Tunnels National Transport University Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka str., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-1040-4530>

Valentyna Kovalenko, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine Omelyana Prytsaka (Kryzhizhanovskogo) str., 1, Kyiv, Ukraine, 03142, e-mail: vkovdp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1196-7730>

Oleksii Rykovtsev, Postgraduate student, Department of Bridges and Tunnels National Transport University, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka str., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, e-mail: rykovtsevoleksii@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-1715-6058>

Vitalii Kovalchuk, Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Railway Transport Lviv Polytechnic National University S. Bandery str., 12, Lviv, Ukraine, 79013, e-mail: kovalchuk.diit@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4350-1756>

**РЕЦЕНЗЕНТИ:**

Тютюкін О. Л., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна.

Касків В. І., кандидат технічних наук, доцент, заступник директора з наукової роботи Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури», Київ, Україна.

**REVIEWER:**

Tyutkin O. L., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine.

Kaskiv V. I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Research, State Enterprise «National Institute for Infrastructure Development», Kyiv, Ukraine.