

А. В. Шевченко
І. В. Маєвська

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПІДЛОГ ПІДЗЕМНИХ ПАРКІНГІВ ІЗ ВЛАШТУВАННЯМ ШАРУ ПОКРИТТЯ ІЗ СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Теза присвячена обґрунтуванню шляхів підвищення зносостійкості підлог підземних паркінгів шляхом улаштування верхнього шару покриття зі сталевібробетону. Проаналізовано специфічні експлуатаційні впливи, що призводять до руйнування бетонних підлог, та наведено переваги застосування дисперсного армування сталевую фіброю для зниження інтенсивності утворення тріщин, підвищення міцності при згині й довговічності покриття.

Ключові слова: сталевібробетон; підземний паркінг; зносостійкість; тріщиностійкість; дисперсне армування; бетонні покриття; експлуатаційна довговічність; ударні навантаження; протижеледні реагенти; абразивне стирання.

Abstracts

The thesis is devoted to substantiating ways to increase the wear resistance of underground parking floors by arranging the top layer of steel fiber concrete. Specific operational influences leading to the destruction of concrete floors are analyzed, and the advantages of using dispersed steel fiber reinforcement to reduce the intensity of crack formation, increase the bending strength and durability of the coating are presented.

Key words: steel fiber concrete; underground parking; wear resistance; crack resistance; dispersed reinforcement; concrete coatings; operational durability; impact loads; anti-icing reagents; abrasive wear.

Вступ

Експлуатаційні умови підлог підземних паркінгів характеризуються комплексним впливом агресивних факторів, серед яких найбільш інтенсивними є абразивне стирання від коліс автотранспорту, повторювані динамічні й ударні навантаження, проникнення талої води з протижеледними реагентами та тривале перебування конструкцій у вологому середовищі. Ці фактори зумовлюють прискорене руйнування традиційних бетонних покриттів, що виявляється в утворенні температурно-усадочних тріщин, локальних відшарувань, зменшенні товщини робочого шару та втраті рівності поверхні. Ремонтні роботи, пов'язані з ліквідацією таких дефектів, є дороговартісними й потребують перерв у функціонуванні паркінгу, що створює додаткові непрямі втрати для його експлуатантів.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення довговічності та експлуатаційної надійності бетонних покриттів у підземних паркінгах, де інтенсивність механічних, кліматичних і хімічних впливів значно вища, ніж у звичайних підлогових конструкціях. У сучасній практиці одним із перспективних рішень є використання сталевібробетону як верхнього конструктивного шару покриття. Завдяки просторовому дисперсному армуванню сталева фібра забезпечує перерозподіл локальних напружень, стримує розвиток мікро- та макротріщин, підвищує міцність бетону при згині та суттєво збільшує стійкість до абразивного стирання. Це дає змогу значно подовжити термін служби експлуатаційних конструкцій та зменшити частоту ремонтів.

Разом з тим, ефективність сталевібробетонних покриттів визначається низкою параметрів – геометрією та кількістю фібри, товщиною шару, характеристиками бетонної матриці та дотриманням технології улаштування. Тому комплексне дослідження властивостей сталевібробетону, механізмів його роботи у структурі підлог підземних паркінгів та аналіз економічної доцільності його застосування є науково й практично значущим завданням [1-4].

Метою даного дослідження є обґрунтування та експериментально-аналітична оцінка ефективності застосування сталевібробетонного верхнього шару в конструкціях підлог підземних паркінгів для

підвищення їх зносостійкості, тріщиностійкості та експлуатаційної довговічності в умовах інтенсивних механічних і хімічних впливів.

Результати дослідження

1. Особливості експлуатаційних умов підлог підземних паркінгів

Підлоги підземних паркінгів зазнають комплексного впливу зовнішніх чинників, серед яких найважливішими є абразивне стирання від коліс автотранспорту, повторювані ударні навантаження, хімічна дія протижелезних реагентів та тривале перебування у вологому середовищі. У таких умовах традиційні бетонні покриття часто демонструють прискорене руйнування, спричинене появою усадочних і температурних тріщин, відшаруванням поверхневого шару та формуванням вибоїн.

Порівняння характеристик звичайного бетону та сталевібробетону наведено у таблиці 1, з якої видно, що сталевібробетон має підвищену міцність при згині, зменшену ширину тріщин та більшу стійкість до стирання. Це свідчить про перспективність використання дисперсноармованих матеріалів у підлогах, де діють значні циклічні та ударні навантаження та наявний вплив протижелезних реагентів [4-6].

Таблиця 1 – Порівняння експлуатаційних характеристик бетону та сталевібробетону

Показник	Звичайний бетон	Сталевібробетон
Міцність при згині, МПа	3,5–4,5	5,0–7,5
Ширина тріщин, мм	0,30–0,45	0,05–0,15
Стійкість до стирання	Середня	Висока (1,8–2,3 раза)
Довговічність у вологому та агресивному середовищі	Обмежена	Підвищена

2. Механізми роботи сталевібробетону з бетонною матрицею

Ефективність сталевібробетону обумовлена роботою фібри в бетонному тілі. Завдяки рівномірному просторовому розподілу фібра запобігає розвитку мікротріщин у ранній фазі тверднення та суттєво впливає на поведінку матеріалу під навантаженням. Під дією навантаження в бетоні формуються мікротріщини, які стримуються фіброю завдяки ефекту «механічного замикання» [1-2]. Фібра бере участь у перенесенні розтягувальних напружень, зменшуючи концентрацію напружень у дефектних зонах та запобігаючи їх подальшому розвитку. Такий принцип роботи забезпечує підвищену тріщиностійкість сталевібробетону порівняно з традиційним бетоном. На рисунку 1 подано схему взаємодії сталевібробетону з матрицею, яка демонструє механізми перенесення розтягувальних напружень волокнами.

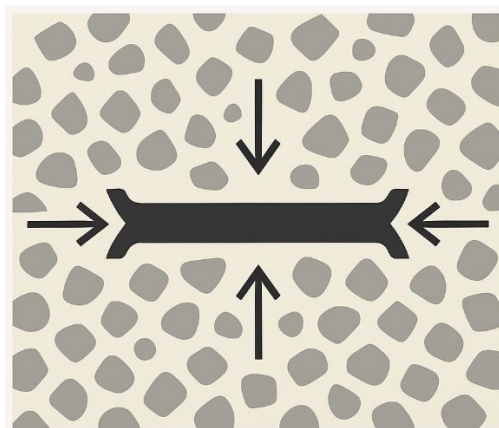


Рис. 1. Схема взаємодії сталевібробетону з бетонною матрицею

Розподіл напружень по товщині сталевібробетонного шару наведено на рисунку 2.

Найбільші напруження фіксуються у верхній частині плити, де відбувається безпосередній контакт із колесами транспортних засобів. Це підтверджує доцільність розташування сталевібробетонного шару саме у верхній зоні покриття, тоді як нижні шари виконують функцію основи [5].

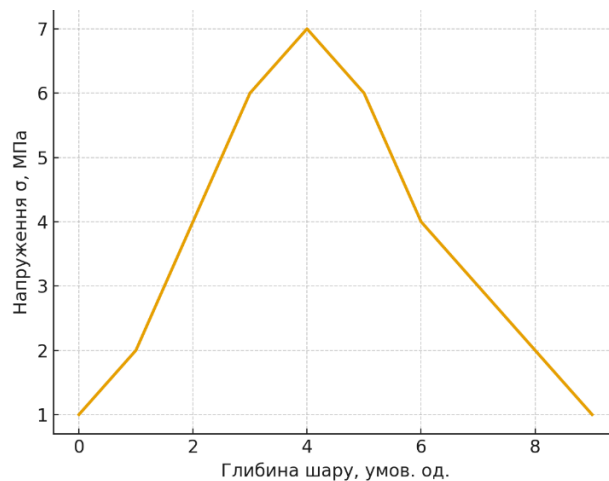


Рис. 2. Розподіл напружень по товщині сталевібробетонного шару

Дисперсне армування також ефективно протидіє утворенню макротріщин, що проявляється у зменшенні їх ширини та глибини. На рисунку 3 подано модель тріщиноутворення в бетоні, де фібра виконує роль мікроякорів, що запобігають розкриттю тріщин під дією повторюваних навантажень. Такий ефект особливо важливий для підземних паркінгів, де відкриті тріщини стають шляхами проникнення агресивних речовин.

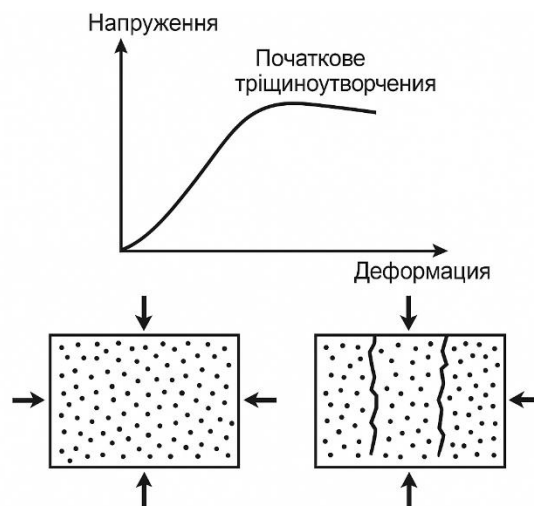


Рис. 3. Модель тріщиноутворення в бетоні

3. Технологічні параметри сталевібробетонних покриттів

Параметри сталевібробетону (табл. 2) мають критичне значення для забезпечення довговічності конструкції. Оптимальна товщина шару становить 60–100 мм, що дозволяє сформувати достатній опір локальним деформаціям та ударам. Рекомендується використовувати фібру довжиною 30–50 мм та дозуванням 20–40 кг/м³, яке забезпечує найкраще співвідношення між пластичністю суміші, міцністю та економічністю [2, 5-8].

Таблиця 2 – Рекомендовані технологічні параметри улаштування сталевібробетонного шару покриття

Параметр	Рекомендоване значення
Товщина сталевібробетонного шару	60–100 мм
Довжина фібри	30–50 мм
Кількість фібри в суміші	20–40 кг/м ³
Повітровтягувальні та антикорозійні добавки	0,5–1,5 %
Клас бетону	C30/37 – C35/45
Просочення	Поліуретанове / силікатне

Інженерні вимоги до етапів улаштування покриття наведено в таблиці 3. Вони регламентують ключові операції: підготовку основи, рівномірне введення фібри в суміш, якісне ущільнення та правильне тверднення. Кожен етап виконання робіт впливає на формування рівномірної структури матеріалу, його міцність, тріщиностійкість і здатність протистояти абразивному зносу. Дотримання цих вимог мінімізує ймовірність появи технологічних дефектів – пористості, розшарування чи недостатнього армування та гарантує стабільну роботу покриття в умовах динамічних навантажень, підвищеної вологості та дії хімічних реагентів.

Таблиця 3 – Технологічні параметри улаштування сталевібробетонного шару у підземних паркінгах

Етап виконання робіт	Технологічна вимога	Обґрунтування
Підготовка основи	Очищення, вирівнювання, укладання поліетиленової мембрани	Запобігання капілярному підсосу вологи та розшаруванню
Приготування суміші	Рівномірне введення фібри протягом 60–120 с; використання пластифікаторів	Забезпечення однорідного дисперсного армування та потрібної рухливості
Укладання сталевібробетону	Розрівнювання правилами, вібрація глибинними вібраторами	Досягнення щільності та уникнення зон із недостатньою кількістю фібри
Товщина шару	60–100 мм залежно від навантаження	Підвищення тріщиностійкості та стійкості до локальних ударних впливів
Первинне тверднення	Захист від висихання (плівкоутворюючі мембрани, волога тканина)	Запобігання появі усадочних тріщин у перші 24 години
Механічне шліфування	Через 48–72 години після укладання	Формування рівної, зносостійкої поверхні
Нанесення зміцнювального просочення	Поліуретанові/силікатні просочення у 1–2 шари	Зменшення пористості та підвищення хімічної стійкості
Введення в експлуатацію	Не раніше ніж через 7 діб; повне навантаження – через 28 діб	Досягнення нормативної міцності і довговічності покриття

4. Аналіз показників зносостійкості та ефективності армування

Експериментальні та аналітичні дослідження свідчать, що збільшення дозування фібри до 30–40 кг/м³ забезпечує істотне зростання зносостійкості матеріалу. Це підтверджується графіком на рисунку 4: інтенсивність стирання зменшується у 2–3 рази порівняно з неармованим бетоном [2, 9]. Подальше збільшення кількості фібри не дає пропорційного ефекту, оскільки структура матеріалу досягає оптимального ступеня насичення.

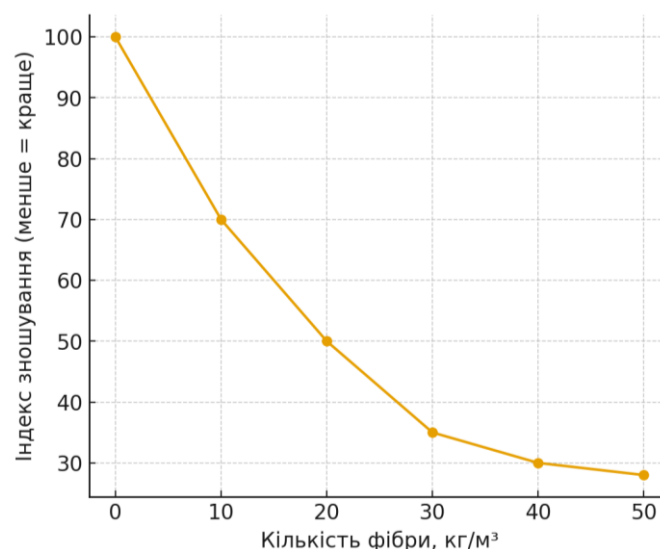


Рис. 4. Залежність зносостійкості від кількості фібри

Вибір форми та геометрії волокна визначає характер його роботи у бетонній матриці та впливає на тріщиностійкість, ударну в'язкість і корозійну стійкість сталевібробетону [2, 11]. Порівняння ефективності різних типів фібри (рис. 5) підтверджує, що найкращі результати забезпечують анкерні

та гачкоподібні волокна, які мають підвищений опір вириванню та забезпечують максимальний рівень тріщиностійкості. Узагальнені характеристики різних типів волокон наведені у таблиці 4.

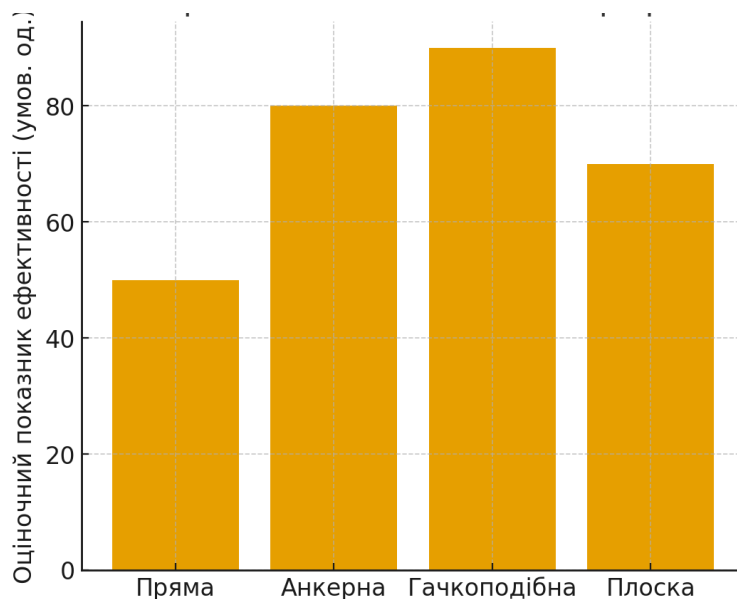


Рис. 5. Порівняння ефективності різних типів сталевих фібри

Таблиця 4 – Типи сталевих фібри та рекомендації щодо застосування в підлогах підземних паркінгів

Тип сталевих фібри	Геометричні параметри	Характеристика роботи	Рекомендації для застосування
Пряма (циліндрична)	$L = 30-50$ мм, $d = 0,6-1,0$ мм	Надає рівномірне дисперсне армування, забезпечує базову тріщиностійкість	Використовується у покриттях з помірним навантаженням
Анкерна (з загнутими кінцями)	$L = 35-50$ мм, $d = 0,8-1,2$ мм	Підвищена зчеплюваність із матрицею, покращена робота на вигин	Оптимальна для більшості паркінгів зі значною кількістю транспортних циклів
Гачкоподібна фібра	$L = 30-60$ мм, $d = 0,7-1,0$ мм	Забезпечує максимальний опір вириванню, покращує ударну в'язкість	Рекомендується для зон із високим динамічним та ударним навантаженням
Плоскоштампована фібра	$b = 2-4$ мм, $t = 0,5-0,7$ мм	Добре працює на перерозподіл напружень, зменшує пластичні деформації	Підходить для тонких шарів сталевібробетону (60–80 мм)
Фібра преміум-класу (з латунним покриттям або антикорозійним захистом)	$L = 30-50$ мм	Підвищена корозійна стійкість, довший строк служби	Доцільна при наявності інтенсивного впливу талої води та солей

5. Економічна доцільність використання сталевібробетону

Попри трохи вищу початкову вартість улаштування шару сталевібробетону, економічний аналіз (табл. 5) показує доцільність цієї технології у довгостроковій перспективі. Зменшення кількості ремонтів, підвищена зносостійкість та значно довший термін служби покриття призводять до скорочення сумарних витрат упродовж життєвого циклу конструкції на 25–45 %.

Таблиця 5 – Порівняльна оцінка експлуатаційних витрат на ремонт підлог паркінгів при використанні звичайного бетону та сталевібробетону

Показник	Традиційний бетон	Сталевібробетон
Орієнтовна частота ремонтів (разів за 10 років)	3–4	1
Середня вартість одного ремонту, грн/м ²	450–700	300–450
Сумарні витрати на ремонт за 10 років, грн/м ²	1350–2800	300–450
Вартість початкового улаштування покриття, грн/м ²	750–900	900–1200
Загальні витрати «життєвого циклу», грн/м ²	2100–3700	1200–1650
Економія за рахунок застосування фібри, %	–	25–45 %

Незважаючи на дещо вищу початкову вартість матеріалу, використання сталевібробетону забезпечує значне зменшення частоти ремонтів та скорочення загальних експлуатаційних витрат. Економічна доцільність пов'язана з тим, що сталевібробетон має вищу стійкість до стирання, ударних навантажень і дії солей, а також меншу схильність до тріщиноутворення, що мінімізує потребу у відновлювальних роботах упродовж тривалого періоду.

Такий ефект є особливо важливим для експлуатованих об'єктів із високим навантаженням, де зупинка роботи паркінгу на час ремонту спричиняє додаткові непрямі витрати.

6. Узагальнення результатів

Аналіз експлуатаційних умов, механізмів роботи сталевібробетону, його технологічних параметрів і довгострокових економічних показників свідчить, що улаштування сталевібробетонного шару є найбільш ефективним шляхом підвищення довговічності та зносостійкості підлог підземних паркінгів. Це підтверджено аналітичними даними, схемами роботи матеріалу (рис. 1–3), експериментальними графіками (рис. 4–5) та систематизацією технічних параметрів у таблицях 1–5. Таблиця 6 узагальнює основні руйнівні фактори, характерні для підземних паркінгів, та демонструє, наскільки ефективно їх можна нейтралізувати завдяки використанню сталевібробетону. Дисперсне армування дозволяє підвищити ударну в'язкість, тріщиностійкість і щільність поверхневого шару. У поєднанні зі зміцнювальними полімерними просоченнями сталевібробетон формує стійке покриття, яке суттєво перевищує традиційні бетонні рішення за довговічністю.

Таблиця 6 – Основні чинники зносу підлог підземних паркінгів та ефективність їх усунення сталевібробетоном

Чинник зносу	Вплив на покриття	Ефективність усунення при застосуванні сталевібробетону
Абразивне стирання від коліс транспорту	Утворення локальних вибоїн, зменшення товщини робочого шару	Висока – фібра зменшує інтенсивність стирання завдяки підвищенню ударної в'язкості
Температурно-усадочні тріщини	Розтріскування поверхні, проникнення вологи і солей	Висока – дисперсне армування запобігає розвитку мікротріщин
Підвищена вологість та талі води	Розм'якшення поверхневого шару, корозія	Середня – сталевібробетон менш чутливий, особливо з просоченнями
Хімічний вплив протижелезних реагентів	Руйнування цементного каменю, відшарування поверхні	Висока – щільна мікроструктура з фіброю зменшує проникність
Динамічні та ударні навантаження	Мікродеформації, локальні відриві фрагментів бетону	Висока – фібра розподіляє напруження та зменшує ризик сколювання

Висновки

Отже, використання сталевібробетонного покриття є ефективним способом підвищення тріщиностійкості, зносостійкості та експлуатаційної довговічності підлог підземних паркінгів. Результати дослідження підтверджують доцільність впровадження дисперсного армування сталевібробетоном як оптимального інженерного рішення для інтенсивно навантажених бетонних поверхонь:

1. Сталевібробетонний шар підлоги підземного паркінгу забезпечує підвищення зносостійкості покриття на 35–50%, порівняно з звичайним бетоном.

2. Дисперсне армування фіброю ефективно обмежує ширину тріщин (у 2,5–3 рази менше), підвищує ударну міцність та опір втомі.

3. Максимальний технічний ефект досягається при дозуванні 25–35 кг/м³ фібри; подальше збільшення економічно малоефективне.

4. Гачкоподібна та анкерна фібра демонструють найкращі показники зчеплення з цементним каменем та опору вириванню, забезпечуючи найвищу довговічність покриття.

5. Використання сталевібробетону зменшує концентрацію пікових напружень у верхній зоні покриття, що знижує ризик поверхневих відшарувань та лущення.

6. Правильна технологія укладання, вібрування та фінішного загладжування є критичною для забезпечення рівномірного розподілу фібри по товщині шару.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вандоловський С.С. Особливості структури сталевібробетону та її удосконалення. *Сучасні виклики будівельної науки*. № 3(15), 2018. URL: <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/uk/article/view/745>
2. Мазурак Р.А. Вплив фібри на зчеплення арматури з бетоном. *Подільський вісник: технічні науки*, № 29, 2018. URL: https://journals.pdu.khmelnitskiy.ua/index.php/podilian_bulletin/article/view/182
3. Біденко І. Механічні характеристики сталевібробетону, армованого фіброю типу HE1050, за короткотривалого стиску. *Експериментальні методи дослідження та діагностика роботи будівельних матеріалів і конструкцій*, 2023. URL: <https://visnyk.lnup.edu.ua/index.php/architecture/article/download/201/200/263>
4. Ren, X. et al. Steel Fiber Reinforced Concrete: A Systematic Review of the Research Progress and Knowledge Mapping. *Sustainability*, 2024, 16(24):10832. DOI: 10.3390/su162410832
5. ElHamahmy, A. A review on the use of steel fibers in concrete slab repair applications. *Building Materials*, 2025. DOI: 10.1007/s44290-025-00346-1
6. Qin, X. et al. Environment-friendly recycled steel fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.132892
7. Wen, Y., Wang, Z., Yuan, X., Yang, X. Optimization of Mechanical Properties and Durability of Steel Fiber-Reinforced Concrete by Nano CaCO₃ and Nano TiC to Improve Material Sustainability. *Sustainability*, 2025, 17(2):641. DOI: 10.3390/su17020641
8. Wu, F., et al. Effects of steel fibre type and dosage on abrasion resistance of steel fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.132892
9. Amin, M.N., Ahmad, W., Khan, K., Ahmad, A. Steel Fiber-Reinforced Concrete: A Systematic Review of the Research Progress and Knowledge Mapping. *Sustainability*, 2023, 16(24):10832. DOI: 10.3390/su162410832
10. Hasnat, A., Ghafoori, N. Abrasion Resistance of Ultra-High-Performance Concrete for Railway Sleepers. *Urban Rail Transit*, 2021, 7:101-116. DOI: 10.1007/s40864-021-00145-8
11. Kamel, O.A. Assessment of Abrasion Resistance of Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete Using Acoustic Emission Monitoring. *Materials and Structures*, 2023, 120(4):41-54. DOI: 10.14359/51738806

Шевченко Андрій Віталійович – студент групи 1Б-24м, Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Маєвська Ірина Вікторівна – доцент кафедри "Будівництва, міського господарства та архітектури". Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com

Shevchenko Andriy – student of group 1B-24m, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Maievskaya Irina – associate professor of the Department of "Building, Urban and Architecture". Vinnitsa National Technical University, Vinnytsia, e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com