

УДК 693.54:628.4036 (043.2)

DOI <https://doi.org/10.32782/apcmj.2025.1.4>**Грабовчак Валентина Валентинівна,**

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних технологій будівництва
факультету архітектури, будівництва та дизайну,
Державний університет «Київський авіаційний інститут»,
просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6315-9639>
E-mail: valentya.hrabovechak@npp.kai.edu.ua

Ковальчук Олександр Юрійович,

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
проректор з наукової роботи та інноваційного розвитку,
Київський національний університет будівництва та архітектури,
просп. Повітряних Сил, 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6337-0488>
E-mail: kovalchuk.oyu@gmail.com

Копотун Руслан Анатолійович,

аспірант кафедри технології будівельних конструкцій і виробів
будівельно-технологічний факультету,
Київський національний університет будівництва та архітектури,
просп. Повітряних Сил, 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2948-8977>
E-mail: kopotun_ra-2024@knuba.edu.ua,

Грабовчак Вікторія Євгенівна,

студентка 1 курсу групи Б-191-24-1-АР
кафедри архітектури та просторового планування
факультету архітектури, будівництва та дизайну,
Державний університет «Київський авіаційний інститут»,
просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4189-5130>
E-mail: vickygrabovchak@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ РЕЦИРКУЛЬОВАНИХ ВІДХОДІВ ЯК КОМПОНЕНТІВ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ У КОНТЕКСТІ ПРИНЦИПІВ СТАЛОГО БУДІВНИЦТВА

Анотація. Масштабні руйнування, спричинені російською агресією, не лише призводять до гуманітарної катастрофи, а й становлять серйозну екологічну проблему. Величезні обсяги будівельних відходів, що утворюються внаслідок таких подій, потребують ефективної утилізації. Одним із перспективних напрямів є використання даних відходів у складі бетонних сумішей. Зазначений підхід дозволяє зменшити обсяги відходів на звалищах, зберегти природні ресурси та сприяти розвитку сталого будівництва. Оскільки лише для відновлення втраченого фонду будівель і споруд знадобиться величезна кількість будівельних матеріалів.

Для оцінювання можливостей використання вторинних будівельних матеріалів у складі бетонів проводяться численні експериментальні дослідження. Учені вивчають вплив різних видів відходів (бетон, цегла, асфальт) на властивості бетону, як-от міцність, водонепроникність, морозостійкість, корозійна стійкість та інші.

У роботі розглянуто можливості створення нових композитних матеріалів, у складі яких використовують рециркульовані заповнювачі. Оскільки рециклінг уважається одним із кращих варіантів для переробки будівельних відходів. Проаналізовано перспективи розвитку технологій використання рециркульованих від-

ходів як компонентів бетонних сумішей у контексті принципів сталого будівництва та концепції відбудови України. Окрім того, особливістю українського досвіду використання рециркульованих відходів стане потенційна наявність залишків органічних речовин і продуктів горіння як результатів ведення воєнних дій, що значно ускладнює розвиток структуроутворення бетонів на основі такого матеріалу.

Дане дослідження може стимулювати розвиток будівельної промисловості, відкрити можливості для переробки значних обсягів відходів, які виникли внаслідок воєнних дій, а також дозволяє збільшити різноманітність виробництва бетонів різного призначення.

Ключові слова: цемент, бетон, рециркуляція, шлаки, лужні цементы, відходи від руйнувань.

Grabovchak Valentyna, Kovalchuk Oleksandr, Kopotun Ruslan, Grabovchak Vicktoria. Research into the possibilities of using recycled waste as components of concrete mixtures in the context of sustainable construction principles

Abstract. *The large-scale destruction caused by Russian aggression creates not only a humanitarian catastrophe, but also a serious environmental problem. The huge volumes of construction waste generated as a result of such events require effective disposal. One of the promising areas is the use of this waste in concrete mixtures. This approach allows you to reduce the volume of waste in landfills, preserve natural resources and promote the development of sustainable construction. Since just to restore the lost stock of buildings and structures, a huge amount of building materials will be needed.*

Numerous experimental studies are being conducted to assess the possibilities of using secondary building materials in concrete. Scientists are studying the impact of various types of waste (concrete, brick, asphalt) on the properties of concrete, such as strength, water resistance, frost resistance, corrosion resistance, and others.

The paper considers the possibilities of creating new composite materials that use recycled aggregates. Since recycling is considered one of the best options for processing construction waste. The prospects for the development of technologies for the use of recycled waste as components of concrete mixtures in the context of the principles of sustainable construction and the concept of reconstruction of Ukraine are analyzed. In addition, a feature of the Ukrainian experience in the use of recycled waste will be the potential presence of residues of organic substances and combustion products as a result of military operations, which significantly complicates the development of structural formation of concretes based on such material.

This study can stimulate the development of the construction industry, opening up opportunities for the processing of significant volumes of waste resulting from military operations, and also allows increasing the diversity of concrete production for various purposes.

Key words: cement, concrete, recycling, slag, alkaline cements, demolition waste.

Вступ. Масштабні руйнування інфраструктури України, спричинені збройною агресією РФ, призвели до накопичення значних обсягів будівельних відходів. За попередніми оцінками, їхня кількість уже сягає кількох мільйонів тон і продовжує зростати. Неконтрольовані звалища з небезпечними матеріалами, що постійно збільшуються, становлять значний ризик для довкілля та здоров'я людей, що потребує негайного вирішення. Лише в Київській області накопичилось 185 тисяч тон відходів [1], серед яких залишки цегли, бетону, деревини, керамічних матеріалів, пластик, азбестові вироби й інші. Варто зазначити, що відходи, які утворились через вибухи, відрізняються від будівельного сміття, яке утворюється внаслідок розбирання будівель, адже складається із залишків різних матеріалів, також може містити і горілі компоненти, що ускладнює його переробку. Ситуація з відхо-

дами руйнації складніша, ніж із будівельними відходами, але має перспективи розвитку.

У вересні 2022 р. Кабінет Міністрів України затвердив постанову № 1073 «Про порядок управління відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд унаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведення робіт з ліквідації їх наслідків» [2]. Оновлене законодавство у сфері управління відходами створює сприятливі умови для розширення масштабів переробки будівельних відходів, зокрема й утворених унаслідок вибухових руйнувань. Це відкриває нові перспективи для використання вторинної сировини в будівельній галузі та сприяє відновленню пошкодженої інфраструктури.

Варто зазначити, що зріс інтерес іноземних інвесторів до створення переробних підприємств в Україні. Також проблема раціональ-

ного поводження з відходами руйнацій війни потрапила в поле зору країн Європи. Окрім того, змінюється погляд на відходи й у середині країни. Місцева влада, стикаючись із браком місць на полігонах і зростанням вартості складування відходів, починає більш жваво цікавитися можливостями переробки [3]. В Україні все більше запроваджуються пілотні проєкти з переробки та використання будівельних відходів як складової частини будівельних матеріалів.

Сучасні технології дозволяють перетворити відходи від руйнацій на цінний ресурс для будівництва. Наприклад, подрібнений бетон можна використовувати як заповнювач у бетонних сумішах, подрібнену цеглу можна використовувати для створення дренажних систем, а дерев'яні відходи – для виробництва біопалива або будівельних матеріалів на основі деревини, метали, як-от мідь і алюміній, можуть бути переплавлені та використані повторно в металургійній промисловості, скло, пластик та інші матеріали також мають потенціал для вторинної переробки та використання в різних галузях. Це відкриває перспективи для використання вторинної сировини у виробництві нових будівельних матеріалів і відновленні пошкоджених об'єктів.

Метою дослідження є проведення аналізу технологічних рішень із підвищення функціональних властивостей бетонів на основі рециркульованих заповнювачів, що дозволить отримувати будівельний матеріал, який характеризується високими фізико-механічними й експлуатаційними властивостями. Це сприятиме зменшенню обсягів відходів на звалищах, дозволить зберегти природні ресурси та сприятиме розвитку сталого будівництва.

Матеріали та методи. Проблема утилізації будівельних відходів стала поштовхом для розвитку нових технологій та індустрії утилізації, повторного використання даних матеріалів, що сприяє переходу до циркулярної економіки. Використання вторинних будівельних матеріалів у складі бетону – це не нова ідея. Проте масштабні руйнування надають даній проблемі особливої актуальності. Основні переваги такого підходу відповідають концепції сталого розвитку [13; 14], полягають у:

- **зменшенні споживання природних ресурсів** [13; 14]: використання вторинних матеріалів дозволяє зменшити видобуток природних компонентів – піску, гравію та щебеню;

- **зменшенні обсягів відходів на звалищах** [15]: переробка будівельних відходів сприяє збереженню довкілля та зниженню ризику забруднення ґрунтових вод і повітря;

- **зниженні витрат на виробництво бетону**: використання вторинних матеріалів зазвичай дешевше, ніж використання первинних;

- **сприянні розвитку економіки** [16]: перехід до циркулярної економіки передбачає мінімізацію відходів і максимальне використання ресурсів.

Процес переробки будівельних відходів передбачає дроблення матеріалів на дрібні фракції. Однак така технологія може призводити до утворення на поверхні частинок залишків цементу й інших домішок, що знижує їхню сумісність із цементним тестом. Варто також зазначити, що погіршення властивостей бетону за використання вторинних заповнювачів зумовлено неналежною адгезією між заповнювачем і цементним каменем. Для вирішення цієї проблеми проводяться дослідження [4–7] з метою розроблення ефективних методів очищення та модифікації поверхні вторинних заповнювачів. Однак застосування цих технологій потребує додаткових витрат.

Згідно з дослідженнями [8; 9], використання відходів як заповнювачів, які характеризуються зниженою середньою густиною та підвищеною пористістю, призводить до погіршення фізико-механічних характеристик бетону, як-от міцність на стиск і розтяг, а також модуль пружності. Це пояснюється необхідністю збільшення кількості води у складі бетонної суміші для забезпечення її рухливості, що призводить до підвищення пористості бетону та зниження його міцності й довговічності.

У роботі [6] аналізується можливість застосування перероблених будівельних матеріалів у відновленні інфраструктури України. Дослідники зазначають, що якість бетону,

виготовленого із вторинних заповнювачів, може варіюватися залежно від технології переробки та характеристик заповнювачів. Зокрема, налипання цементного розчину на поверхню заповнювачів може призводити до зниження міцності та підвищення усадки бетону. Автори пропонують детально вивчити ці процеси для розроблення ефективних технологій використання вторинних будівельних матеріалів.

Отже, актуальним напрямом досліджень є використання рециклінгованих відходів як компонентів будівельних сумішей. Проте дослідники стикаються із проблемою підвищеної пористості та водопоглинання матеріалів, виготовлених із використанням таких відходів, що негативно впливає на фізико-механічні й експлуатаційні властивості. Для вирішення цієї проблеми науковці зосереджуються на вивченні процесів структуроутворення в цементному камені з метою розроблення композитів зі здатністю до самовідновлення. Однак для покращення властивостей бетонів із перероблених заповнювачів необхідно вирішити низку проблем, пов'язаних із їхньою підвищеною пористістю, водопоглинанням і проникністю. Для цього необхідно провести комплекс досліджень, спрямованих на вивчення мінералогічного складу заповнювачів, їхньої водопоглинаючої здатності й ефективності різних модифікуючих добавок.

Варто зазначити, що наукові дослідження виконуються в рамках Держбюджетної тематики та будуть висвітлені в анотованому звіті.

Результати. Взаємодія між компонентами бетонної суміші визначає її довговічність. Мікроструктура бетону, що формується у процесі твердіння, та міцність цементного каменю безпосередньо впливають на його стійкість до зовнішніх впливів. Вибір в'язучого, його мінералогічний склад, водоцементне співвідношення, добавки, заповнювачі й особливості пористої структури – усі ці компоненти визначають властивості бетону та його здатність протистояти руйнуванню. Під час проектування бетонних конструкцій необхідно враховувати умови експлуатації та рівень агресивності середовища, щоб забезпечити оптимальний вибір матеріалів.

Як показали дослідження П. Кривенка, К. Пушкарьової та інших науковців НДІВМ КНУБА, фізико-хімічні процеси, що відбуваються в контактній зоні між цементним каменем і заповнювачем, визначають багато важливих властивостей бетону, зокрема його міцність. Властивості цього перехідного шару залежать від низки чинників, як-от мінералогічний склад компонентів бетону й умови твердіння. Характер взаємодії між цементним каменем і різними видами заповнювачів у бетоні зумовлює формування різноманітних контактних зон.

Встановлено, що лужні бетони, у складі яких використовували рециркуляційні заповнювачі, характеризуються міцністю на стиск у межах 15–39,8 МПа після 28 діб витримування в нормальних умовах, це свідчить про те, що фізико-механічні властивості рециркульованих бетонних компонентів суттєво впливають на властивості як свіжих, так і затверділих бетонних сумішей. Також варто зазначити, що водоцементне відношення бетонів на основі рециркульованих заповнювачів перебуває в межах 0,5–0,8, це потребує проведення додаткових досліджень шляхом підбору оптимального складу сумішей, оскільки дані заповнювачі характеризуються високою водопоглинаючою здатністю.

Механізми взаємодії активних лужних в'язучих систем із гранітним заповнювачем, досліджені в НДІВМ КНУБА, пояснюють підвищення міцності й інших властивостей бетону. Інтенсивне утворення зародків на поверхні граніту та кристалохімічна спорідненість продуктів гідратації сприяють формуванню міцної контактної зони. Пуцоланова активність золи-винесення забезпечує додаткове цементування системи та підвищує її корозійну стійкість, що можна побачити на зразках, виготовлених на основі лужного пуцоланового та композиційного цементу (рис. 1). Під час дослідження корозійної стійкості можна відмітити, що всі композиції за тривалого зберігання в агресивних середовищах на 30 добу витримування включно підвищують міцнісні характеристики в порівнянні з контрольними зразками, що варто пов'язувати з ефектом поглиблення гідратації.

Проте вже за 6 місяців композиції на основі цементу ШПЦ III/A-400 стрімкіше втрачають показник міцності на згин, який становить у розчині морської солі 10 МПа, а в розчині Na_2SO_4 – 2,9 МПа, порівняно з композиціями на основі лужних золотмісних цементів, міцність на згин яких перебуває в межах 8,8–13,5 МПа.

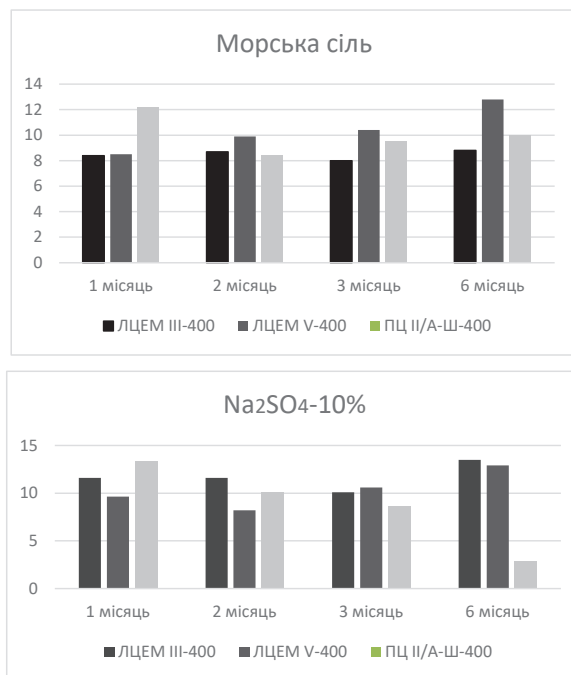


Рис. 1. Діаграми зміни фізико-механічних показників лужних цементів в агресивному середовищі

Висновки. Питання ефективного використання будівельних відходів є одним із найактуальніших у сучасній будівельній галузі. Багато науковців досліджують можливості застосування бетонних відходів як одного з компонентів бетонних сумішей. Однак використання таких відходів пов'язане з деякими труднощами. Зокрема, підвищена пористість і водопоглинання матеріалу, отриманого з використанням бетонних відходів, можуть призвести до зниження його міцності. Як показали дослідження, бетони на основі рециркуляційних заповнювачів характеризуються водоцементним відношенням у межах 0,5–0,8.

З метою підвищення міцності та довговічності бетонних конструкцій із використанням перероблених заповнювачів необхідно провести низку експериментальних досліджень, дослідити вплив різних видів в'язучих речовин на структурні особливості бетонів на основі рециркульованих заповнювачів. Оскільки було встановлено, що лужні бетони, які містять у своєму складі відходи промисловості, характеризуються високими фізико-механічними й експлуатаційними показниками. Зокрема, планується детально вивчити вплив мінералогічного складу, водопоглинання та пористості заповнювачів на властивості бетону.

Список використаних джерел:

1. Можливості переробки будівельних відходів від руйнувань. URL: <https://surl.li/fnwixv> (дата звернення: 22.01.2025).
2. Про затвердження Порядку управління відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд унаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків, та внесення змін до деяких постанов Кабінету Міністрів України : постанова КМУ № 1073. *Верховна Рада України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1073-2022-%D0%BF#Text> (дата звернення: 22.01.2025).
3. Вивезення, сортування, утилізації відходів руйнацій війни: оцінка практик та пропозиції експертів. URL: <https://gurt.org.ua/news/informator/98294/> (дата звернення: 22.01.2025).
4. Рихліцька О. Бетони з підвищеними експлуатаційними властивостями на основі заповнювачів рециклінгу бетону : дис. ... докт. філософ. : 192 ; 19. Львів, 2023. 176 с.
5. Гончар О. Конструкційні бетони, отримані з використанням відходів промисловості. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. Вип. 76. С. 78–84.
6. Troian V., Gots V., Keita E., Roussel N., Angst U., Flatt R.J. Challenges in Material Recycling for Post-war Reconstruction. *RILEM Tech Lett.* 2022. № 7. P. 139–149.
7. Kovalchuk O., Zozulynets V., Tomczak A., Warsza R., Ruvin O., Grabovchak V. Mix Design of Acid Resistant Alkali Activated Materials for Reconstruction of the Building Constructions Damaged by the War. *International Journal of Conservation Science*. 2024. P. 43–52.
8. Abdel Hafez R.D., Hadzima-Nyarko M., Ahmed S.M., Tayeh B.A. Recycled Chicken Feather Sand as a Partial Replacement for Natural Sand for Producing Eco-Friendly Mortar. *Buildings*. 2023. № 13. P. 421.

9. Guo H., Shi C., Guan X., Zhu J., Ding Y., Ling T.C., Zhang H., Wang Y. Durability of recycled aggregate concrete : A review. *Cement and Concrete Composites*. 2018. № 89. P. 251–259.
10. Нонік Л., Пацева І., Пічкур Т. Розроблення стратегії управління відходами руйнацій в умовах воєнного стану. URL: <https://surl.li/mecibz> (дата звернення: 22.01.2025).
11. Krivenko P., Kovalchuk O., Boiko O. Practical experience of construction of concrete pavement using non-conditional aggregates. In *IOP Conference Series “Materials Science and Engineering”*. IOP Publishing, 2019. Vol. 708. № 1. P. 012089. DOI: 10.1088/1757-899X/708/1/012089.
12. Abdel Hafez R.D., Hadzima-Nyarko M., Ahmed S.M., Tayeh B.A. Recycled Chicken Feather Sand as a Partial Replacement for Natural Sand for Producing Eco-Friendly Mortar. *Buildings*. 2023. № 13. P. 421.
13. Take Action for the Sustainable Development Goals. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/> (дата звернення: 22.01.2025).
14. Про затвердження Національної економічної стратегії на період до 2030 р. : постанова КМУ № 179. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/179-2021-%D0%BF#Text> (дата звернення: 22.01.2025).
15. Коссе І. Перероблення будівельних відходів: виклики та можливості для України. URL: <https://salo.li/F1fe168> (дата звернення: 22.01.2025).
16. Прогноз економічного і соціального розвитку України. URL: <https://surl.li/rqmisq> (дата звернення: 22.01.2025).

References:

1. Mozhlyvosti pererobky budivelnykh vidkhodiv vid ruynuvan (2024). [Possibilities of recycling construction waste from destruction]. Retrieved from <https://surl.li/fnwixv> [in Ukrainian].
2. Postanova KМУ “Pro zatverdzhennia Poriadku upravlinnia vidkhodamy, shcho utvorylys u zviazku z poshkodzhenniam (ruinuvanniam) budivel ta sporud vnaslidok boiovykh dii, terorystychnykh aktiv, dyversii abo provedenniam robit z likvidatsii yikh naslidkiv ta vnesennia zmin do deiakykh postanov Kabinetu Ministriv Ukrainy” [Resolution of the CMU “On approval of the Procedure for the management of waste generated in connection with the damage (destruction) of buildings and structures as a result of hostilities, acts of terrorism, sabotage or carrying out work to eliminate their consequences and amending some resolutions of the Cabinet of Ministers of Ukraine”]. *Verkhovna Rada of Ukraine*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1073-2022-%D0%BF#Text>.
3. Vyvezenia, sortuvannia, utylizatsii vidkhodiv ruinasii viiny: otsinka praktyk ta propozytsii ekspertiv (2024). [Removal, sorting, and disposal of war destruction waste: Assessment of practices and expert proposals]. Retrieved from <https://gurt.org.ua/news/informator/98294/> [in Ukrainian].
4. Rykhlicka, O. (2023). *Betony z pidvyshchenymy ekspluatatsiynymy vlastyvostiamy na osnovi zapovniuvachiv retsyklingu betonu* [Concretes with enhanced performance properties based on recycled concrete aggregates] (Doctoral dissertation). National University “Lviv Polytechnic”, Ministry of Education and Science of Ukraine [in Ukrainian].
5. Honchar, O. (2019). *Konstruksiini betony, otrymani z vykorystanniam vidkhodiv promyslovosti* [Structural concretes obtained using industrial waste]. *Visnyk ODABA*, (76), 78–84 [in Ukrainian].
6. Troian, V., Gots, V., Keita, E., Roussel, N., Angst, U., & Flatt, R.J. (2022). Challenges in material recycling for postwar reconstruction. *RILEM Technical Letters*, 7, 139–149 [in Ukrainian].
7. Kovalchuk, O., Zozulynets, V., Tomczak, A., Warsza, R., Ruvin, O., Grabovchak, V. (2024). Mix Design of Acid Resistant Alkali Activated Materials for Reconstruction of the Building Constructions Damaged by the War. *International Journal of Conservation Science*. 43–52 [in English].
8. Abdel Hafez, R.D., Hadzima-Nyarko, M., Ahmed, S.M., & Tayeh, B.A. (2023). Recycled chicken feather sand as a partial replacement for natural sand for producing eco-friendly mortar. *Buildings*, 13 (421) [in English].
9. Guo, H., Shi, C., Guan, X., Zhu, J., Ding, Y., Ling, T.C., Zhang, H., & Wang, Y. (2018). Durability of recycled aggregate concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 89, 251–259 [in English].
10. Nonik, L., Patseva, I., & Pichkur, T. (2023). Rozroblennia stratchii upravlinnia vidkhodamy ruinasii v umovakh voiennoho stanu [Development of a strategy for managing demolition waste under martial law]. Retrieved from <https://surl.li/mecibz> [in Ukrainian].
11. Krivenko, P., Kovalchuk, O., & Boiko, O. (2019, December). Practical experience of construction of concrete pavement using non-conditional aggregates. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708 (1), 012089. Retrieved from <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012089> [in Ukrainian].
12. Abdel Hafez, R.D., Hadzima-Nyarko, M., Ahmed, S.M., & Tayeh, B.A. (2023). Recycled chicken feather sand as a partial replacement for natural sand for producing eco-friendly mortar. *Buildings*, 13 (421). Retrieved from <https://doi.org/10.3390/buildings13020421> [in English].

13. United Nations (n.d.). Take action for the sustainable development goals. Retrieved from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/> [in English].
14. Postanova KМУ № 179 “Pro zatverdzhennia Natsionalnoi ekonomichnoi stratehii na period do 2030 r.”. *Verkhovna Rada of Ukraine*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/179-2021-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].
15. Kosse, I. (2024). *Pereroblennia budivelnykh vidkhodiv: vyklyky ta mozhlyvosti dlia Ukrainy* [Recycling construction waste: Challenges and opportunities for Ukraine]. Retrieved from <https://salo.li/F1fe168> [in Ukrainian].
16. *Prohnoz ekonomichnoho i sotsialnoho rozvytku Ukrainy (2024)*. [Economic and social development forecast of Ukraine]. Retrieved from <https://surl.li/rqmisq> [in Ukrainian].