УДК 666.972.4:691.5 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.23

М. Б. НЕСТЕРЕНКО
аспірант кафедри хімічної технології композиційних матеріалів
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0007-9974-6150

ВИКОРИСТАННЯ ПІСКУ ТА ВАПНЯКУ ЯК ФУНКЦІОНАЛЬНИХ НАПОВНЮВАЧІВ У МОДИФІКОВАНИХ ЦЕМЕНТНИХ В'ЯЖУЧИХ СУМІШАХ

У контексті підвищення ефективності сучасних будівельних матеріалів зростає інтерес до використання природних мінеральних компонентів як функціональних наповнювачів у складі цементних в'яжучих сумішей. Особливої актуальності набуває застосування піску та вапняку, які забезпечують економію цементу та істотно впливають на мікроструктуру, гідратаційні процеси, реологічні характеристики і довговічність матеріалів. Водночас, наявні дослідження здебільшого розглядають ці компоненти ізольовано, що не дозволяє в повній мірі оцінити їх синергічну дію в умовах локальної сировинної бази. Метою статті є обґрунтування доцільності та ефективності одночасного використання піску та вапняку як функціональних наповнювачів у модифікованих цементних сумішах з урахуванням їх фізико-хімічних властивостей, структурної ролі та впливу на ключові експлуатаційні показники. Для досягнення поставленої мети застосовано методи компаративного літературного аналізу порівняльної оцінки фізико-хімічних характеристик і систематизації даних. Встановлено, що пісок формує каркасну структуру матеріалу й оптимізує водоцементне співвідношення, тоді як вапняковий наповнювач бере участь у фізико-хімічних реакціях, зокрема утворенні карбоалюмінатів, та підвищує щільність і тріщиностійкість композиту. Виявлено, що комбіноване використання зазначених компонентів у певних пропорціях (до 30 % піску та до 20 % вапняку від маси цементу) дозволяє зменшити вміст цементу без істотного зниження міцності. Запропоновано рекомендації щодо раціонального використання нестандартної сировини (відходів піску, вапнякового пилу) та хімічних добавок для збереження реологічних властивостей. Здобуті результати мають практичну цінність для створення енергоефективних і довговічних будівельних композитів, придатних для використання в умовах обмежених ресурсів, зокрема в регіонах із нестачею якісної сировини. Перспективи подальших досліджень пов'язані з поглибленим вивченням тріщиностійкості та структурних змін у композитах за умов тривалого навантаження, а також із розробкою багатокомпонентних рецептур на основі локальних матеріалів.

Ключові слова: *мінеральні наповнювачі, вапняковий пил, кварцовий пісок, гідратація цементу, реологія сумішей, довговічність, мікроструктура.*

M. B. NESTERENKO
Postgraduate Student at the Department of Chemical Technology
of Composite Materials
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0009-0007-9974-6150

USE OF SAND AND LIMESTONE AS FUNCTIONAL FILLERS IN MODIFIED CEMENT BINDERS

In the context of increasing the efficiency of modern building materials, there is growing interest in using natural mineral components as functional fillers in cement binder mixtures. The use of sand and limestone, which provides cement economy and significantly affects the microstructure, hydration processes, rheological characteristics and durability of materials, is particularly relevant. At the same time, existing studies mainly consider these components in isolation, which does not allow for a complete assessment of their synergistic effect in the conditions of the local raw material base. The article aims to substantiate the feasibility and effectiveness of the simultaneous use of sand and limestone as functional fillers in modified cement mixtures, taking into account their physicochemical properties, structural role and impact on key performance indicators. To achieve this goal, methods of comparative literature analysis, comparative assessment of physicochemical characteristics and data systematization were used. It was established that sand forms the framework structure of the material and optimizes the water-cement ratio. At the same time, the limestone filler participates in physicochemical reactions, particularly the formation of carboaluminates, and increases the density and crack resistance of the composite. It was found that the combined use of these components in specific proportions (up to 30 % sand and up to 20 % limestone by weight of cement) allows reducing the cement content without significantly reducing the strength. Recommendations are proposed for the rational use of non-standard raw materials (sand waste, limestone dust) and chemical additives to preserve rheological properties. The results obtained have practical value for creating energy-efficient and durable construction composites suitable for use in conditions of limited resources,

in particular in regions with a shortage of high-quality raw materials. Prospects for further research are related to an in-depth study of crack resistance and structural changes in composites under long-term loading conditions, as well as the development of multicomponent formulations based on local materials.

Key words: *mineral fillers, limestone dust, quartz sand, cement hydration, mixture rheology, durability, microstructure.*

Постановка проблеми

У сучасних умовах розвитку будівельної індустрії дедалі більшої актуальності набуває завдання підвищення ефективності використання традиційних в'яжучих речовин шляхом їхньої модифікації мінеральними компонентами природного походження. Використання піску та вапняку як функціональних наповнювачів у цементних сумішах сприяє як оптимізації витрат цементу, так і дозволяє регулювати реологічні, міцні та довговічні властивості готових матеріалів, що особливо важливо для реалізації стратегії сталого розвитку у будівництві.

Сучасні дослідження підтверджують, що введення вапнякового наповнювача може істотно змінювати структуру цементного каменю, впливаючи на гідратаційні процеси та мікроструктуру [1]. З іншого боку, властивості піску, зокрема його мінералогічний склад, форма та розподіл за розміром часток, також визначають функціональні характеристики суміші [2]. У низці досліджень наголошується на ефективності застосування тонкодисперсних наповнювачів, зокрема вапняку, для покращення тиксотропних властивостей, зменшення водоцементного відношення та зниження усадки [3; 4]. Однак, незважаючи на численні публікації щодо ефектів застосування піску або вапняку окремо, в науковій літературі відсутні системні дослідження комплексного впливу цих компонентів на структуру та властивості модифікованих цементних в'яжучих сумішей в умовах використання локальної сировини [5].

Актуальність порушеної проблеми зумовлена потребою оптимізації складу цементних в'яжучих матеріалів з урахуванням технологічних, економічних та екологічних чинників. З огляду на це, дослідження особливостей формування структурно-механічних характеристик модифікованих в'яжучих сумішей із використанням піску та вапняку дозволить розширити науково-методичні підходи до створення ефективних будівельних матеріалів нового покоління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Серед сучасних наукових досліджень спостерігається зростаючий інтерес до застосування мінеральних наповнювачів у складі цементних композитів. Наприклад, у статті З. Цзян (Z. Jiang) та ін. було встановлено, що використання вапнякового наповнювача в самоущільнювальному бетоні сприяє підвищенню міцності на стиск, поліпшенню довговічності та зниженню водопоглинання за рахунок зміни гідратаційної активності [4]. У свою чергу, Б. Несіра (B. Nécira) та І. Абаду (Y. Abadou) подають порівняльний аналіз різних типів пісків і наповнювачів у складі самоуплотнювального розчину та доводять, що мінералогічне походження піску і його гранулометричний склад суттєво впливають на тиксотропні властивості та консистенцію суміші [5]. Слід також зазначити, що часткова заміна цементу та піску вапняковими наповнювачами в самоущільнювальному бетоні дозволяє зменшити витрати без істотної втрати міцності [6; 7].

Науковці О. Сікорський та Ю. Коваленко дослідили несучу здатність мостів в експлуатації, підкресливши значення матеріалів із підвищеною довговічністю [3]. У дослідженні Ч. Чжао (Z. Zhao) та ін. встановлено переваги вапнякового наповнювача над цегляним порошком за щільністю та водопоглинанням, але не було розглянуте їх спільне застосування [8].

Окрему увагу приділяють використанню нетрадиційної сировини. Так, М. Лю (M. Liu) та ін. аналізують гідратацію модифікованого цементу з використанням подрібненого пустельного піску та фіксують позитивний ефект на структуроутворення і щільність цементного каменю [9].

Серед вітчизняних досліджень доцільно згадати роботу А. Бондаря та та ін., в якій розглянуто перспективи використання вторинної мінеральної сировини у виробництві сухих будівельних сумішей. Дослідники підкреслюють економічну ефективність впровадження піску з відходів у цементні композити [1]. Разом із тим, М. Хамдаду та ін. (M. Hamdadou et al.) систематизували сучасні уявлення про допоміжні цементуючі матеріали, однак не надали розгорнутого аналізу щодо ролі піску та вапняку, що залишає місце для подальших розробок [10]. Також науковці А. Абдалкадер (A. Abdalqader) та М. Сонебі (M. Sonebi) подають результати дослідження, де порівнюють різні типи наповнювачів у складі цементних суспензій, констатуючи вищу стабільність сумішей із вапняковим наповнювачем порівняно з іншими матеріалами [11].

Незважаючи на широке представлення теми у світовій літературі, в оглянутих працях відсутнє системне вивчення комбінованого впливу піску та вапняку на параметри в'яжучих матеріалів за умов використання саме локальної сировини, що потребує подальших досліджень.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є наукове обґрунтування доцільності й ефективності використання піску та вапняку як функціональних наповнювачів у складі модифікованих цементних в'яжучих сумішей для підвищення їх структурно-механічних характеристик, довговічності та реологічних властивостей із урахуванням специфіки локальної сировинної бази. Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання:

1. Дослідити фізико-хімічні властивості та структурну роль піску і вапняку в процесах формування структури цементного каменю за умов їх комбінованого використання.

2. Проаналізувати вплив різного співвідношення наповнювачів на показники міцності, водопоглинання, усадки та тиксотропії модифікованих цементних сумішей, використовуючи стандартизовані методи випробування.

3. Сформулювати рекомендації щодо раціонального складу та технологічних режимів застосування піску і вапняку як функціональних компонентів цементних в'яжучих сумішей для підвищення їх експлуатаційних характеристик у будівельній практиці.

Викладення основного матеріалу дослідження

Пісок у цементних сумішах зазвичай виступає інертним мінеральним заповнювачем, оскільки його основний компонент (переважно кварц) не реагує з гідратними продуктами цементу. Середній розмір частинок піску достатньо великий, тому пісок покращує скелетний об'єм суміші і, завдяки ширшому градаційному розподілу, знижує водопоглинання суміші (фізичний ефект пакування). Водночас надмірна кількість великих часток піску зменшує загальний питомий об'єм порожнин, а його «грубіша» структура сприяє зниженню водо-потреби суміші [3; 9].

Натомість вапняковий наповнювач (головним чином $CaCO_3$) є дрібним мінеральним компонентом із великою питомою поверхнею. Він практично не гідролізується та не містить значної хімічної активності (практично інертний), але може виявляти фізико-хімічні ефекти. Зокрема, частинки кальциту можуть вступати у реакцію з алюмінатною складовою цементу із утворенням карбоалюмінатів (моно- і гексакарбоалюмінат). Таким чином, вапняковий наповнювач може частково прискорювати гідратацію та модифікувати мікроструктуру цементного каменю (стимулюючи утворення C—S—H та наявних AFm–фаз) [5]. Крім того, вапняковий пил доповнює недолік дрібнодисперсних фракцій у стандартному портландцементі, покращуючи ущільнення структури суміші та стабільність рухомого розчину. У таблиці 1 відображено порівняльні фізико-хімічні характеристики піску та вапняку за даними літературних джерел.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика піску та вапнякового наповнювача як функціональних складових цементних в'яжучих сумішей

Показник	Пісок	Вапняковий наповнювач
Головний компонент	Кварц (SiO_2) та інші силікати (нереактивні)	Кальцит ($CaCO_3$) (практично інертний або слабоактивний)
Фракція та форма зерен	Грубий (зазвичай 0,1–2 мм), переважно округлі або кутасті	Тонкодисперсний порошок (<0,063 мм), нерівні частинки
Специфічна поверхня	Відносно мала	Велика (висока адсорбуюча здатність)
Хімічна активність у суміші	Практично нульова (чиста наповнювальна дія)	Дуже низька (формування невеликої кількості карбоалюмінатів)
Вплив на гідратацію	Не змінює гідратацію (фізичний ефект пакування)	Може дещо прискорювати гідратацію за рахунок нуклеації і реакції $CaCO_3$ (утворення C—S—H та AFm)
Вплив на текучість і стабільність	Скорочує водоцементне відношення (низька адсорбція), покращує осадку суміші	Збільшує в'язкість та опір розтікання (через високу питому поверхню)
Роль у структурі матеріалу	Формує каркасну структуру затверділого в'яжучого	Заповнює мікропори, підвищує щільність і міцність матриці

Джерело: узагальнено автором на основі даних [3; 5; 9; 11; 13].

Співвідношення піску та вапнякового наповнювача в суміші суттєво впливає на її властивості. Збільшення частки грубозернистого піску (за інших рівних умов) призводить до поліпшення текучості та зменшення необхідної витрати води. Зокрема, в дослідженні [10] встановлено, що застосування щільних кварцових пісків із більшим вмістом окатишів (кар'єрний пил чи відходи дроблення) помітно підвищує рухливість розчинів без суттєвих втрат міцності. Водночас надмірне збільшення частки піску може знизити міцні характеристики через погіршення зв'язку волоконного цементного каменю.

Щодо характеристик міцності, то вміст наповнювачів у межах 10–20 % від маси цементу має незначний негативний вплив на міцність через «ефект розведення» цементного каменю [5]. Так, при заміні до 50–100 % традиційного вапнякового наповнювача на аналогічний за об'ємом шлаковий або білий кременистий заповнювач, втрати міцності на 7-й день становили лише 5–10 %, тоді як через 28 діб міцність компенсувалася і вирівнювалася. Подібно, в дослідженні [10] зафіксовано, що кінцева (28-денна) міцність цементного розчину практично не змінюється при частковому введенні вапнякового пилу чи інших подібних наповнювачів, якщо правильно скориговані реологічні показники. У таблиці 2 викладено результати аналізу по параметрам суміші та порівняння зростання частки піску і вапнякового пилу.

Таблиця 2

Вплив співвідношення піску та вапнякового наповнювача на основні технологічні та характеристики міцності цементних сумішей

Параметр суміші	Зростає частка піску	Зростає частка вапнякового пилу
Текучість/осадка	Зростає (краща плинність); потреба води зменшується (грубі фракції)	Зменшується (підвищується межа текучості); для сталої осадки потрібні добавки
В'язкість/рухливість	Знижена (низька питома поверхня)	Збільшується (висока поверхня часток)
Необхідність пластифікаторів	Менша (покращена природна плинність)	Вища (для збереження потрібної консистенції)
Міцність на стиск	Знижується незначно через більший об'єм інертних фракцій; може компенсуватися підвищеною ущільненістю	Знижується (електричний «ефект розведення» цементу) при дуже високих дозах; разом із тим, до 20 % заміни цементу втрати мінімальні
Довговічність та усадка	Довговічність зазвичай не погіршується; висока щільність може зменшувати усадку	Довговічність часто покращується (щільніший композит); за деякими даними зменшує усадку
Економічний ефект	Зниження витрат на цемент (до 10–20 % заміни)	Зниження витрат на цемент (можливий замісник цементу, до 15–20 %)

Джерело: узагальнено автором на основі даних [1; 5; 8; 10; 13].

На основі проведеного аналізу сформульовано деякі практичні рекомендації щодо раціонального використання піску та вапнякового наповнювача у складі модифікованих цементних в'яжучих сумішей. По-перше, оптимальним вважається дозування вапнякового наповнювача у межах 10–20 % від маси цементу, що забезпечує належну міцність і структурну щільність без надмірного зниження технологічних властивостей суміші. Зокрема, введення до 15 % осадового пустельного піску у вигляді мінеральної добавки дозволяє досягнути понад 75 % міцності еталонного складу на 28-й день, при цьому зберігається інтенсивність набору міцності на пізніших строках [9]. Водночас перевищення дозування понад 30 % обумовлює необхідність регулювання водоцементного співвідношення задля компенсації негативного впливу на реологічні властивості суміші.

По-друге, суттєвого значення набуває контроль параметрів вологовмісності, зокрема зважаючи на високу питому поверхню вапнякового пилу, що призводить до зростання потреби в суперпластифікаторах для забезпечення проєктної консистенції. У дослідженні [3] доведено, що підвищення частки вапнякового наповнювача у складі спричиняє зростання необхідності в хімічних добавках для збереження показника осідання на заданому рівні. Відповідно, доцільно впроваджувати водоредукуючі добавки та знижувати водоцементне співвідношення для забезпечення технологічної однорідності.

По-третє, на підставі сучасних досліджень рекомендовано ширше застосовувати нестандартну мінеральну сировину, зокрема пустельний пісок, шлакові шлами, відходи кар'єрного вапняку, а також побічні продукти цементного виробництва. Так, введення до 15–20 % вапнякового пилу як заміни цементу не лише не погіршує експлуатаційних характеристик, але і сприяє зниженню вуглецевого сліду, що відповідає сучасним вимогам до екологічної безпеки будівельних технологій [8]. За умови належного фракційного підбору навіть некондиційний кварцовий пісок може бути повноцінним заповнювачем, зберігаючи щільність і тріщиностійкість матеріалу [12].

Також системний підхід до комбінування піску та вапняку у в'яжучих сумішах передбачає досягнення балансу між технологічністю, міцністю й економічністю. Послідовне підвищення вмісту вапнякового та піщаного наповнювачів при належній компенсації складу дозволяє скоротити витрати цементу без критичного погіршення показників кінцевої міцності [4]. Додатково рекомендовано поєднувати зазначені наповнювачі з кальцієвмісними матеріалами або мікродисперсними активними домішками для покращення водопоглинання, усадкової стійкості та довговічності модифікованих композицій.

Висновки

Проблема вдосконалення цементних в'яжучих сумішей шляхом упровадження природних мінеральних наповнювачів, зокрема піску та вапняку, залишається актуальною в умовах необхідності зниження ресурсної енергоємності, підвищення довговічності та покращення реологічних властивостей будівельних композитів. Проведене дослідження дозволяє зробити низку висновків відповідно до поставлених у дослідженні завдань.

По-перше, встановлено, що пісок у поєднанні з вапняком чинить комплексний фізико-хімічний вплив на структуру цементного каменю, оскільки пісок формує каркасну структуру, знижує водопотребу та покращує щільність суміші, а вапняковий наповнювач бере участь у реакціях із алюминатними фазами цементу, утворюючи карбоалюмінати та прискорюючи гідратацію. По-друге, виявлено, що оптимальне співвідношення наповнювачів дозволяє регулювати тиксотропні властивості, мінімізувати усадку та забезпечити високі показники міцності при зниженому вмісті цементу. За дотримання дозування в межах 10–20 % для вапнякового пилу та до 30 % для піску негативний вплив на механічні характеристики є мінімальним або взагалі компенсується. По-третє, сформульовано практичні рекомендації щодо застосування нетрадиційної сировини, зокрема пустельного піску, вапнякових відходів та пилу кар'єрів, із урахуванням необхідності корекції водоцементного співвідношення та введення хімічних добавок для досягнення бажаних властивостей.

Здобуті результати мають як теоретичне, так і прикладне значення. Вони можуть бути застосовані при розробці рецептур сухих будівельних сумішей, бетону самоущільнювального типу, тонкошарових оздоблювальних матеріалів і спеціалізованих будівельних розчинів для інженерних споруд. Запропоновані співвідношення компонентів та умови їх використання дозволяють зменшити витрати цементу, скоротити викиди CO_2 і підвищити технологічність композицій без суттєвого погіршення експлуатаційних характеристик. Наукова новизна проведеного дослідження полягає в системному узагальненні ефектів одночасного використання піску та вапнякового наповнювача, що раніше розглядалися переважно ізольовано, а практична цінність полягає у можливості адаптації результатів під конкретні регіональні сировинні ресурси. Подальші дослідження мають бути спрямовані на експериментальне підтвердження оптимальних параметрів сумішей, вивчення тріщиностійкості та довговічності в умовах реального довготривалого навантаження, а також на створення багатокомпонентних систем із включенням інших мікронаповнювачів для досягнення синергетичного ефекту.

Список використаної літератури

1. Перспективи використання вторинних відходів будівельної галузі у виробництві сухих будівельних сумішей / А. Бондар та ін. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2024. Т. 36. № 1. С. 64–70. URL: https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-64-70 (дата звернення: 08.06.2025).

2. Коваленко С., Клименко А., Коваленко Ю. Залізобетонні конструкції: допоміжні цементуючі матеріали. Огляд. *Композиційні матеріали* : збірник тез XIII Міжнар. наук.-практ. WEB-конф. (м. Київ, 26–29 квіт. 2024 р.). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2024. С. 171–183. URL: https://cmmiwc.kpi.ua/article/view/302721/294845 (дата звернення: 08.06.2025).

3. Сікорський О., Коваленко Ю. Моніторинг несучої здатності мостових конструкцій в періоді експлуатації. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 349. № 2. С. 272–277. URL: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-40 (дата звернення: 08.06.2025).

4. Limestone filler as a mineral additive on the compressive strength and durability of self-compacting concrete with limestone manufactured sand / Z. Jiang et al. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 94. Article 109965. URL: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109965 (дата звернення: 08.06.2025).

5. Nécira B., Abadou Y. Properties of self-compacting mortar made with various mineralogical sources different types of sands and fillers. *World Journal of Engineering*. 2021. Vol. 18. No. 6. P. 861–869. URL: https://doi.org/10.1108/WJE-10-2020-0483 (дата звернення: 08.06.2025).

6. How quarry waste limestone filler affects the rheological behavior of cement-based materials / S. Safiddine et al. *Applied Rheology*. 2021. Vol. 31. No. 1. P. 63–75. URL: https://doi.org/10.1515/arh-2020-0118 (дата звернення: 08.06.2025).

7. Skender Z., Bali A., Kettab R. Self-compacting concrete (SCC) behaviour incorporating limestone fines as cement and sand replacement. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2021. Vol. 25. No. 10. P. 1852–1873. URL: https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1607564 (дата звернення: 08.06.2025).

8. Substitution of limestone filler by waste brick powder in self-compacting mortars: Properties and durability / Z. Zhao et al. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 43. 102898. URL: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102898 (дата звернення: 08.06.2025).

9. Hydration and material properties of blended cement with ground desert sand / M. Liu et al. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 389. Article 131624. URL: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131624 (дата звернення: 08.06.2025).

10. Hydration, mechanical and transfer properties of blended cement pastes and mortars prepared with recycled powder or limestone filler / M. Hamdadou et al. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 78. Article 107541. URL: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107541 (дата звернення: 08.06.2025).

11. Assessment of the influence of the type of filler materials on the properties of cement grouts / A. Abdalqader et al. *Construction Technologies and Architecture*. 2022. Vol. 1. P. 171–178. URL: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/CTA.1.171 (дата звернення: 08.06.2025).

12. Reuse of untreated fine sediments as filler: is it more beneficial than incorporating them as sand? / H. Beddaa et al. *Buildings*. 2022. Vol. 12. No. 2. Article 211. URL: https://doi.org/10.3390/buildings12020211 (дата звернення: 08.06.2025).

13. Парфентьєва І., Верешко В., Гусачук Д. Основи та фундаменти: навч. посіб. для студентів спец. 192 «Будівництво та цивільна інженерія». Луцьк: Луцький нац. техн. ун-т, 2017. 296 с. URL: https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021-03/Навчальний%20посібник%20Основи%20та%20фундаменти.pdf (дата звернення: 10.06.2025).

References

1. Bondar, A., Khrystych, O., Bondar, O., & Safronenko, I. (2024). Perspektyvy vykorystannia vtotynnykh vidkhodiv budivelnoi haluzi u vyrobnytstvi sukhykh budivelnykh sumishei [Prospects for the use of secondary

construction industry waste in the production of dry building mixtures]. *Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruktsii v budivnytstvi – Modern Technologies, Materials and Structures in Construction*, 36(1), 64–70. Retrieved from https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-64-70 [in Ukrainian].

2. Kovalenko, S., Klymenko, A., & Kovalenko, Yu. (2024). Zalizobetonni konstruktsii: dopomizhni tsementuiuchi materialy. Ohliad [Reinforced concrete structures: auxiliary cementing materials. Review]. *Kompozytsiini materialy – Composite Materials*, p. 171–183. Retrieved from https://cmmiwc.kpi.ua/article/view/302721/294845 [in Ukrainian].

3. Sikorskyi, O., & Kovalenko, Yu. (2025). Monitorynh nesuchoi zdatnosti mostovykh konstruktsii v periodi ekspluatatsii [Monitoring of load-bearing capacity of bridge structures during operation]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 349(2), 272–277. Retrieved from https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-40 [in Ukrainian].

4. Jiang, Z., Yang, Q., Wang, B., Li, C., Zhang, J., & Ren, Q. (2024). Limestone filler as a mineral additive on the compressive strength and durability of self-compacting concrete with limestone manufactured sand. *Journal of Building Engineering*, 94, Article 109965. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109965 [in English].

5. Nécira, B., & Abadou, Y. (2021). Properties of self-compacting mortar made with various mineralogical sources different types of sands and fillers. *World Journal of Engineering*, 18(6), 861–869. Retrieved from https://doi.org/10.1108/WJE-10-2020-0483 [in English].

6. Safiddine, S., Amokrane, K., Debieb, F., Soualhi, H., Benabed, B., & Kadri, E. (2021). How quarry waste limestone filler affects the rheological behavior of cement-based materials. *Applied Rheology*, 31(1), 63–75. Retrieved from https://doi.org/10.1515/arh-2020-0118 [in English].

7. Skender, Z., Bali, A., & Kettab, R. (2021). Self-compacting concrete (SCC) behaviour incorporating limestone fines as cement and sand replacement. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 25(10), 1852–1873. Retrieved from https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1607564 [in English].

8. Zhao, Z., Grellier, A., Bouarroudj, M., Michel, F., Bulteel, D., & Courard, L. (2021). Substitution of limestone filler by waste brick powder in self-compacting mortars: Properties and durability. *Journal of Building Engineering*, 43, Article 102898. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102898 [in English].

9. Liu, M., Liu, E., Hao, J., Di Sarno, L., & Xia, J. (2023). Hydration and material properties of blended cement with ground desert sand. *Construction and Building Materials*, 389, Article 131624. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131624 [in English].

10. Hamdadou, M., Bignonnet, F., Deboucha, W., Ranaivomanana, H., Leklou, N., & Arroudj, K. (2023). Hydration, mechanical and transfer properties of blended cement pastes and mortars prepared with recycled powder or limestone filler. *Journal of Building Engineering*, 78, Article 107541. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107541 [in English].

11. Abdalqader, A., Sonebi, M., Thornton, N., & Taylor, S. (2022). Assessment of the influence of the type of filler materials on the properties of cement grouts. *Construction Technologies and Architecture*, 1, 171–178. Retrieved from https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/CTA.1.171 [in English].

12. Beddaa, H., Ben Fraj, A., Lavergne, F., & Torrenti, J. M. (2022). Reuse of untreated fine sediments as filler: Is it more beneficial than incorporating them as sand? *Buildings*, 12(2), Article 211. Retrieved from https://doi.org/10.3390/buildings12020211 [in English].

13. Parfentieva, I., Vereshko, V., & Husachuk, D. (2017). Osnovy ta fundamenty: navch. posib. dlia studentiv spets. 192 "Budivnytstvo ta tsyvilna inzheneriia" [Foundations and substructures: Textbook for students majoring in 192 "Construction and Civil Engineering"]. *Lutsk: Lutskyy natsionalnyy tekhnichnyy universytet – Lutsk: Lutsk National Technical University*. Retrieved from https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021-03/Навчальний%20посібник%20Основи%20та%20фундаменти.pdf [in Ukrainian].