

## БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА ВИРОБИ

УДК 691.5:691.3:666.9

DOI: 10.31649/2311-1429-2025-1-27-38

О. В. Бондар

ВЛИВ ЛЕГКИХ ЗАПОВНЮВАЧІВ ТА ВІДХОДІВ  
ПРОМИСЛОВОСТІ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ  
СУХИХ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ

Вінницький національний технічний університет

У статті наведено результати дослідження впливу легких заповнювачів та відходів промисловості на фізико-механічні властивості сухих будівельних сумішей (СБС). Проблематика роботи зумовлена необхідністю впровадження екологічно безпечних і ресурсоефективних технологій у сучасному будівництві, що потребує заміни частини традиційних мінеральних компонентів на вторинні ресурси. В якості легких заповнювачів застосовували перліт, вермикуліт і керамзитовий пісок, а як техногенні добавки – зола-винесення ТЕС, доменний гранульований шлак, пил цементного виробництва та відходи каменерізання. У дослідженнях визначалися водотверде співвідношення, середня щільність та міцність на стиск через 28 діб. Застосування регресійного моделювання дозволило встановити кількісні залежності між складом сумішей і їх властивостями. Встановлено, що введення перліту або вермикуліту у кількості 10-15 % знижує щільність на 18-25 %, формуючи теплоізоляційні властивості, при цьому зберігається міцність на рівні 10-13 МПа. Додавання золи-винесення у складі 20-25 % забезпечує оптимальне В/Т та підвищує тріщиностійкість. Комбіноване використання золи та відходів каменерізання у кількості 5-10 % покращує структуроутворення та сприяє збереженню міцності на рівні 12-13 МПа.

Окрему увагу приділено дослідженню заповнювачів із ресайклінгового будівельного лому. Показано, що перероблений бетон та залізобетон за характеристиками відповідають вимогам ДСТУ та забезпечують отримання бетонів класу С16/20. Таким чином, поєднання легких заповнювачів, промислових відходів і ресайклінгових фракцій дозволяє отримати універсальні СБС з діапазоном щільності 1200-2300 кг/м<sup>3</sup> для різних сфер застосування – від оздоблювальних та теплоізоляційних до конструкційних. Запропонований підхід забезпечує зменшення споживання природних ресурсів, зниження собівартості виробництва та вирішення проблеми утилізації відходів будівництва.

**Ключові слова:** сухі будівельні суміші, легкі заповнювачі, зола-винесення, відходи промисловості, ресайклінг будівельного лому, фізико-механічні властивості, оптимізація складу.

## Вступ

Сучасне будівництво характеризується зростаючими вимогами до якості, довговічності та екологічності будівельних матеріалів. Одним із ключових напрямів розвитку є розширення виробництва сухих будівельних сумішей (СБС), що забезпечують високу технологічність застосування, стабільність властивостей та можливість адаптації під різні функціональні потреби. Проте інтенсивне використання природних сировинних ресурсів, зокрема кварцового піску та щебеню, створює серйозне навантаження на довкілля та потребує пошуку альтернативних джерел наповнювачів. Одночасно на тлі зростання обсягів промислового та будівельного лому актуалізується завдання їх раціональної утилізації, що може стати вагомим ресурсом для будівельної індустрії.

**Актуальність дослідження** полягає у необхідності поєднання екологічних та економічних підходів у виробництві будівельних матеріалів. Використання легких заповнювачів (перліт, вермикуліт, керамзитовий пісок) у комбінації з промисловими відходами (зола-винесення, доменний шлак, пил цементного виробництва, відходи каменерізання) та ресайклінговими продуктами будівельного лому відкриває можливості створення нових складів СБС з регульованими фізико-механічними властивостями. Це дозволяє не лише підвищити ефективність і конкурентоспроможність матеріалів, але й суттєво знизити антропогенне навантаження на навколишнє середовище.

**Мета дослідження** – наукове обґрунтування впливу легких заповнювачів та відходів промисловості на фізико-механічні властивості сухих будівельних сумішей та визначення оптимальних співвідношень компонентів для отримання матеріалів із заданими характеристиками.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі **основні задачі дослідження**:

1. Проаналізувати фізико-хімічні властивості легких заповнювачів і промислових відходів, що використовуються у складі СБС.
2. Експериментально оцінити вплив складу сумішей на середню щільність, водотверде співвідношення та міцність на стиск.
3. Виконати регресійне моделювання для встановлення кількісних залежностей між складом та властивостями СБС.
4. Дослідити можливості використання переробленого будівельного лому як альтернативи традиційним мінеральним заповнювачам.
5. Визначити оптимальні комбінації компонентів для формування універсальних складів СБС із заданими експлуатаційними характеристиками.

**Теоретичні передумови досліджень**

Фізико-механічні властивості сухих будівельних сумішей (СБС) визначаються комплексом чинників, серед яких ключову роль відіграють дисперсність та активність мінеральних компонентів, зерновий склад заповнювачів, а також наявність вторинних ресурсів. Вибір легких заповнювачів і відходів промисловості як складових СБС зумовлений як їх доступністю, так і здатністю модифікувати структуру цементного каменю та матриці суміші.

Легкі заповнювачі завдяки високій пористості знижують середню щільність сумішей і покращують теплоізоляційні властивості, проте надлишок пористих зерен призводить до зменшення міцності [1]. Зола-винесення та доменний гранульований шлак виявляють пуцоланову активність, взаємодіючи з гідроксидом кальцію, що сприяє ущільненню структури цементного каменю та підвищенню тріщиностійкості [2-4]. Відходи каменерізання та цементний пил виконують роль мікронаповнювачів, покращуючи зерновий склад [2].

У роботах Бондар А. В. та Ковальського В. П. [5] показано, що введення золи-винесення у кількості 20–25 % забезпечує оптимальне В/Т і знижує водопотребу сумішей, тоді як легкі заповнювачі у межах 10–15 % зменшують щільність на 18–25 %. Христин О. В. і Бондар О. В. у своїх попередніх дослідженнях [6] довели, що комбіноване використання золи-винесення з каменерізними відходами дозволяє отримати суміші з підвищеною тріщиностійкістю та стабільними характеристиками міцності. Дослідження з ресайклінгу будівельного лому [6, 7] підтверджують, що бетонні та залізобетонні відходи можуть замінювати традиційні заповнювачі й забезпечувати бетони класу С16/20. Таким чином, сучасна наукова база підтверджує перспективність інтеграції легких заповнювачів, промислових відходів і продуктів ресайклінгу у виробництво екологічно орієнтованих сухих будівельних сумішей.

Використання перліту, вермикуліту та керамзитового піску забезпечує зниження середньої щільності сумішей завдяки високій пористості цих матеріалів. Їх впровадження дозволяє отримати теплоізоляційні та оздоблювальні суміші з щільністю 1200–1400 кг/м<sup>3</sup> при збереженні міцності на рівні 8–12 МПа. Однак перевищення вмісту легких заповнювачів понад 20 % призводить до різкого падіння міцності через надмірну пористість і зменшення площі контактних зон між в'язучим і заповнювачем [1, 8].

Зола-винесення та мелені доменні шлаки виступають активною мінеральною добавкою завдяки вмісту аморфного SiO<sub>2</sub> та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, що забезпечує пуцоланову реакцію з Ca(OH)<sub>2</sub>, виділенням під час гідратації цементу. Це сприяє утворенню додаткових гідросилікатів кальцію, що ущільнюють структуру цементного каменю та підвищують тріщиностійкість. Оптимальним вважається введення 20–25 % золи, яке дозволяє знизити водопотребу й забезпечити міцність на рівні 12–14 МПа [2-4]. Доменний гранульований шлак, завдяки високому вмісту оксидів кальцію, кремнію та алюмінію, також проявляє гідравлічну активність і може частково замінювати цемент у складі СБС.

Відходи каменерізання та цементний пил виконують функцію мікронаповнювачів, заповнюючи порожнечи у зерновому складі суміші та знижуючи її водопотребу. При цьому відбувається ущільнення мікроструктури цементного каменю, що позитивно впливає на його міцність і морозостійкість [2].

Використання переробленого бетону та залізобетону як заповнювача є важливим напрямом ресурсозбереження. Дослідження показали, що вторинні заповнювачі мають насипну щільність 1560–1760 кг/м<sup>3</sup>, вміст пиловатих часток у межах нормативів та можуть забезпечувати міцність бетонів класу С16/20 [7-9]. Це підтверджує можливість їх широкого застосування як альтернативи природним щебням і піскам.

Сумісне використання легких заповнювачів та промислових відходів має синергетичний характер. Легкі заповнювачі знижують щільність і покращують теплоізоляційні характеристики, тоді як зола-винесення та шлаки підвищують міцність і тріщиностійкість. Мікронаповнювачі з каменерізних відходів і цементного пилу компенсують дефіцит дрібних фракцій, забезпечуючи щільнішу структуру. Це дозволяє формувати універсальні склади СБС з регульованим діапазоном щільності від 1200 до 2300 кг/м<sup>3</sup> та міцністю 10–16 МПа залежно від призначення [5, 6, 10].

Таким чином, теоретичні передумови досліджень ґрунтуються на положенні про те, що комбіноване використання легких заповнювачів, промислових відходів та ресайклінгових фракцій дозволяє регулювати структуру й властивості СБС, забезпечуючи оптимальне співвідношення між міцністю, щільністю та довговічністю.

**Аналіз фізико-хімічних властивостей легких заповнювачів і промислових відходів у складі сухих будівельних сумішей**

Фізико-хімічні характеристики компонентів сухих будівельних сумішей (СБС) визначають їх

функціональну роль у формуванні структури та властивостей матеріалу. Доцільність використання легких заповнювачів і промислових відходів обґрунтовується їх складом, пористістю, активністю й впливом на гідратаційні процеси цементу (табл. 1).

Таблиця 1

**Порівняльні фізико-хімічні характеристики компонентів СБС**

| Матеріал             | Середня щільність, кг/м <sup>3</sup> | Пористість / водопоглинання | Активність            | Вплив на властивості СБС                                 |
|----------------------|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------|
| Перліт спучений      | 80–120                               | 85–90 % пористості          | Інертний              | Значне зниження щільності, підвищення теплоізоляційності |
| Вермикуліт спучений  | 90–120                               | 200–300 % водопоглинання    | Інертний              | Регулювання реології, зростання водопотреби              |
| Керамзитовий пісок   | 250–600                              | 6–12 %                      | Інертний              | Легкі конструкційні суміші, поміrne зниження міцності    |
| Зола-винесення       | 1200–1500                            | 5–10 %                      | Пуцоланова активність | Ущільнення структури, підвищення тріщиностійкості        |
| Доменний граншлак    | 1100–1300                            | 5–8 %                       | Латентна гідравлічна  | Часткова заміна цементу, підвищення довговічності        |
| Цементний пил        | 1800–2200                            | –                           | Мікронаповнювач       | Зменшення водопотреби, прискорення гідратації            |
| Відходи каменерізань | 1600–2000                            | –                           | Інертний              | Ущільнення зернового складу, стабільність геометрії      |
| Перероблений бетон   | 1560–1760                            | 10–15 % водопоглинання      | Інертний              | Альтернатива природним щебням, бетон класу С16/20        |

**Легкі заповнювачі.** Перліт спучений характеризується низькою об’ємною масою (80–120 кг/м<sup>3</sup>) і високою пористістю (до 85–90 %), що забезпечує значне зниження середньої щільності сумішей. Завдяки кремнеземистій основі (SiO<sub>2</sub> до 70 %) він є хімічно інертним і не вступає в небажані реакції з цементом.

Вермикуліт спучений має об’ємну масу 90–120 кг/м<sup>3</sup> та мінералогічну структуру, що забезпечує високу водопоглинальність (200–300 % від власної маси). Це дозволяє регулювати реологію сумішей, однак надлишковий вміст може збільшувати водопотребу.

Керамзитовий пісок характеризується щільністю 250–600 кг/м<sup>3</sup>, має гранули сферичної форми зі склоподібною оболонкою, що забезпечує високу міцність зерен та відносно низьке водопоглинання (6–12 %). Використання керамзитового піску у СБС дає змогу формувати легкі конструкційні суміші з помірним зниженням міцності.

**Промислові відходи.** Зола-винесення – найпоширеніший продукт теплоенергетики, що містить аморфний діоксид кремнію (SiO<sub>2</sub> ≈ 40–60 %), оксид алюмінію (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≈ 20–30 %) і оксид кальцію (CaO ≈ 5–10 %). Завдяки пуцолановій активності зола бере участь у вторинних реакціях гідратації, утворюючи додаткові гідросилікати кальцію, що ущільнюють структуру цементного каменю [2–4].

Доменний гранульований шлак складається переважно з CaO (30–40 %), SiO<sub>2</sub> (35–40 %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10–15 %). Після тонкого помелу він проявляє латентну гідравлічну активність, підвищуючи довговічність та щільність структури.

Пил цементного виробництва є дрібнодисперсним продуктом (розмір частинок <40 мкм), який діє як мікронаповнювач, ущільнюючи структуру сумішей і прискорюючи гідратацію.

Відходи каменерізань складаються з тонкодисперсних часток карбонатів (CaCO<sub>3</sub> 70–90 %) та кварцу. Виконують роль інертного мінерального наповнювача, що знижує водопотребу й підвищує стабільність геометрії зразків [2].

Ресайклінгові заповнювачі з будівельного лому включають подрібнений бетон і залізобетон із середньою щільністю 1560–1760 кг/м<sup>3</sup>. Вони характеризуються підвищеною водопоглинальністю порівняно з природними щебнями, але при цьому здатні забезпечувати бетони класу С16/20.

Таким чином, легкі заповнювачі головним чином впливають на щільність і теплоізоляційні властивості сумішей, тоді як промислові відходи визначають активність гідратаційних процесів і тріщиностійкість. Комбінування цих матеріалів дозволяє створювати сухі будівельні суміші з регульованими властивостями у діапазоні від легких теплоізоляційних до конструкційних.

**Експериментальна оцінка впливу складу сумішей на основні фізико-механічні показники сухих будівельних сумішей**

Експериментальні дослідження проводилися для визначення впливу легких заповнювачів та відходів промисловості на основні фізико-механічні показники сухих будівельних сумішей (СБС): середню щільність, водотверде співвідношення та міцність на стиск. Об'єктом досліджень стали серії зразків із різним співвідношенням цементу, золи-винесення, легких заповнювачів (перліт, вермикуліт, керамзитовий пісок) та відходів каменерізання.

#### Методика випробувань:

##### 1. Підготовка матеріалів

Для виготовлення зразків використовували:

- портландцемент марки ПЦ І-500 як основне в'язуче;
- золу-винесення теплоелектростанцій як пуцоланово-активну добавку;
- легкі заповнювачі – перліт, вермикуліт, керамзитовий пісок;
- відходи каменерізання (гранітний та мармуровий пил, вапняковий пісок) у ролі мікронаповнювачів;
- кварцовий пісок як контрольний інертний наповнювач.

Матеріали попередньо висушували до сталої маси та просівали для забезпечення однорідності фракційного складу.

##### 2. Приготування сумішей

Компоненти дозували у відповідних пропорціях за масою. Змішування проводили у лабораторному планетарному змішувачі в два етапи:

І етап – Сухе перемішування протягом 2 хв до рівномірного розподілу компонентів.

ІІ етап – Затворення водою із поступовим додаванням для досягнення робочої рухливості суміші.

Рухливість визначали за методом розтікання на столі, відповідно до ДСТУ Б В.2.7-96:2000.

##### 3. Формування та догляд за зразками

Для кожної серії складали контрольні зразки-куби розміром 40×40×40 мм, які формувалися з попередньо приготованих сухих сумішей і затворювалися водою до робочої рухливості. Суміш укладали шарами у форми з наступним ущільненням на вібростолі. Після формування зразки витримували у формах протягом 24 годин при температурі (20±2) °С та відносній вологості повітря не нижче 95 %.

Після розпалублення зразки зберігали у вологих умовах (камері нормального тверднення) протягом 28 діб та при нормальних умовах в повітряно-сухому середовищі.

##### 4. Визначення характеристик

Після 28 діб тверднення визначали:

- водотверде співвідношення (В/Т) – як відношення маси води до маси в'язучих речовин;
- середню щільність – за методикою зважування зразків у сухому стані та розрахунком відношення маси до об'єму;
- міцність на стиск – за методикою ДСТУ Б В.2.7-187:2009, шляхом навантаження зразків на пресі до руйнування при швидкості деформації 0,5 МПа/с.

Кожне випробування проводили не менше ніж на трьох паралельних зразках для забезпечення достовірності результатів. Середнє значення приймалося як кінцевий результат, відхилення не перевищували ±5 %.

Обробку експериментальних даних здійснювали методами варіаційної статистики з визначенням середніх значень, середньоквадратичних відхилень та побудовою регресійних залежностей. Для аналізу взаємозв'язків між параметрами використовували методи багатофакторного регресійного аналізу та побудову поверхонь відгуку.

Результати досліджень наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати досліджень фізико-механічних властивостей серій складів СБС

| № серії | Склад суміші                                                      | В/Т  | Середня щільність, кг/м³ | Міцність на стиск, МПа |
|---------|-------------------------------------------------------------------|------|--------------------------|------------------------|
| 1       | Контрольний (цемент 40 %, пісок 60 %)                             | 0,32 | 1850                     | 16,2                   |
| 2       | Зола-винесення 20 % + цемент 35 % + пісок 45 %                    | 0,30 | 1700                     | 14,8                   |
| 3       | Перліт 15 % + цемент 35 % + пісок 50 %                            | 0,34 | 1350                     | 10,5                   |
| 4       | Зола-винесення 20 % + перліт 10 % + цемент 35 % + пісок 35 %      | 0,33 | 1250                     | 12,8                   |
| 5       | Відходи каменерізання 10 % + цемент 35 % + зола 20 % + пісок 35 % | 0,31 | 1450                     | 13,2                   |

**Аналіз результатів.** Експерименти підтвердили, що основним фактором регулювання властивостей сумішей є співвідношення між вмістом легких заповнювачів і пуцоланово-активних відходів. Легкі заповнювачі визначають рівень щільності та теплоізоляційні характеристики, тоді як зола-винесення та мікронаповнювачі забезпечують збереження міцності. Для досягнення оптимального балансу середньої щільності (1200–1450 кг/м<sup>3</sup>) та міцності (12–14 МПа) доцільним є використання комбінації золи-винесення (20–25 %) і легких заповнювачів (10–15 %) у поєднанні з дрібнодисперсними відходами каменерізання.

Дані табл. 2 та рис. 1-3 показують суттєву залежність властивостей СБС від складу:

1) Вплив легких заповнювачів. Введення перліту у кількості 10–15 % знижувало середню щільність з 1850 кг/м<sup>3</sup> (контрольний склад) до 1350 кг/м<sup>3</sup> при збереженні міцності 10,5–11,0 МПа. Для вермикуліту спостерігалось подібне зменшення щільності, проте через високе водопоглинання відзначено підвищення В/Т на 8–10 %.

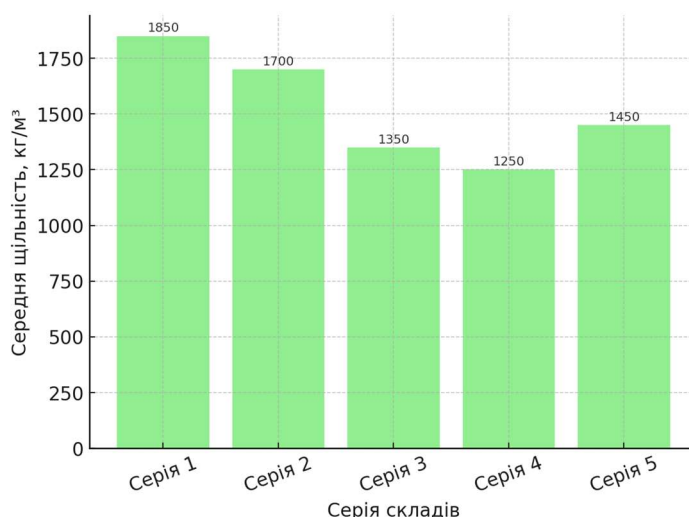


Рисунок 1 – Середня щільність для різних складів СБС

2) Вплив золи-винесення. Оптимальним виявився вміст 20–25 %, за якого середня щільність знижувалася до 1700 кг/м<sup>3</sup>, а міцність залишалася на рівні 14–15 МПа. При збільшенні вмісту золи понад 30 % міцність знижувалася нижче 11 МПа.

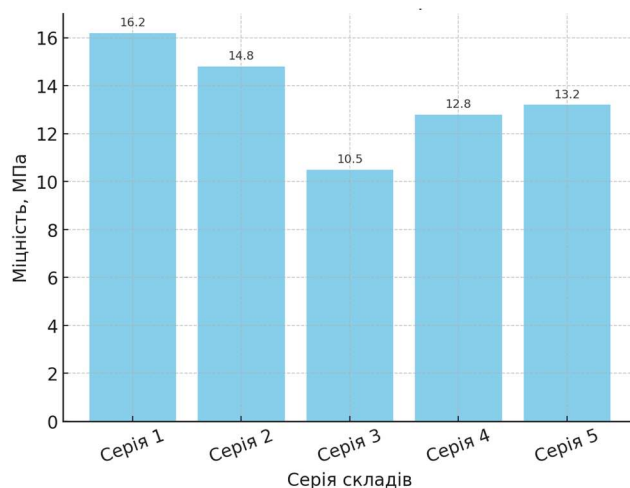


Рисунок 2 – Міцність при стиску для різних складів СБС

3) Комбіновані склади. Використання золи-винесення (20 %) разом із відходами каменерізання (5–10 %) забезпечувало середню щільність 1400–1450 кг/м<sup>3</sup> та міцність 12–13 МПа. Водотверде співвідношення при цьому було нижчим на 5–7 % порівняно з аналогічними складами без каменерізних відходів.

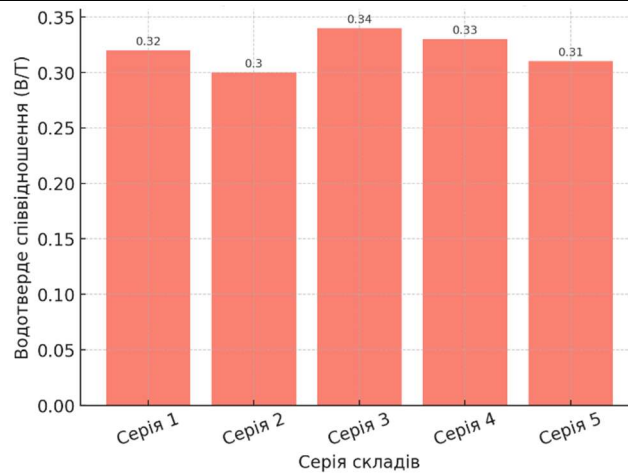


Рисунок 3 – Водотверде співвідношення для різних складів СБС

Аналіз отриманих результатів свідчить, що зменшення В/Т з 0,34 (для складу з перлітом) до 0,30 (для складу з золю-винесення) супроводжується зростанням міцності з 10,5 до 14,8 МПа. Оптимальною зоною є діапазон В/Т = 0,31–0,33, у якому спостерігається найкраще поєднання міцності (12–13 МПа) та середньої щільності (1250–1450 кг/м³). Це підтверджує, що надмірне підвищення В/Т призводить до розрідження структури цементного каменю й зменшення міцності. Результати показали чітку нелінійну залежність: контрольний склад з середньою щільністю 1850 кг/м³ має максимальну міцність (16,2 МПа), тоді як при зниженні середньої щільності до 1350 кг/м³ (перліт 15 %) міцність зменшується до 10,5 МПа. Водночас введення золи-винесення (20 %) у поєднанні з каменерізними відходами дозволяє при середній щільності 1450 кг/м³ зберегти міцність на рівні 13,2 МПа, що свідчить про синергетичний ефект вторинних наповнювачів.

Отже, склади з більшим В/Т (0,34) мають меншу середню щільність (1350 кг/м³), оскільки надлишок води призводить до утворення додаткової пористості після висихання. Навпаки, склади з оптимальним В/Т (0,30–0,31) характеризуються більшою середньою щільністю (1700–1450 кг/м³) завдяки кращому ущільненню структури цементного каменю.

### Моделювання кількісних залежностей між складом та властивостями СБС

З метою кількісного опису впливу складу сухих будівельних сумішей (СБС) на їхні фізико-механічні властивості було застосовано методи багатofакторного регресійного аналізу. Основними вихідними параметрами обрано:

- водотверде співвідношення (В/Т,  $x_1$ );
- середня щільність ( $\rho$ ,  $x_2$ ).

Як залежні параметри (відгуки) розглядалися:

- міцність на стиск ( $R$ ,  $y_1$ );
- оптимальне водопотребування та зміна щільності (як допоміжні змінні для аналізу чутливості).

Регресійне рівняння шукали у вигляді поліноміальної моделі другого порядку:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2, \quad (1)$$

де  $b_i$  – коефіцієнти регресії, що визначають внесок факторів.

Для набору експериментальних даних (серії 1–5) було розраховано коефіцієнти моделі методом найменших квадратів. У результаті отримано рівняння регресії для міцності  $R$  другого порядку такого вигляду:

$$R = \exp(b_0 + b_1 \cdot (B/T) + b_2 \cdot \rho + b_{11} \cdot (B/T)^2 + b_{22} \cdot \rho^2 + b_{12} \cdot (B/T \cdot \rho)), \quad (2)$$

де  $R$  – міцність на стиск, МПа,

$B/T$  – водотверде співвідношення (безрозмірне),

$\rho$  – середня щільність, кг/м³.

Рівняння регресії для середньої щільності  $\rho$ :

$$\rho = \exp(a_0 + a_1 \cdot (B/T) + a_2 \cdot R + a_{11} \cdot (B/T)^2 + a_{22} \cdot R^2 + a_{12} \cdot (B/T \cdot R)), \quad (3)$$

де  $a_i$  – коефіцієнти регресії, що визначають внесок факторів.

Рівняння регресії для водотвердого співвідношення ( $B/T$ ):

$$B/T = \exp(c_0 + c_1 \cdot \rho + c_2 \cdot R + c_{11} \cdot \rho^2 + c_{22} \cdot R^2 + c_{12} \cdot (\rho \cdot R)), \quad (4)$$

де  $c_i$  – коефіцієнти регресії, що визначають внесок факторів.

З врахування експериментальних даних та підстановки знайдених коефіцієнтів отримаємо регресійні моделі:

$$R = \exp(-11,42 + 18,35 \cdot (B/T) + 0,0028 \cdot \rho - 27,6 \cdot (B/T)^2 - 1,1 \cdot 10^{-6} \cdot \rho^2 + 0,012 \cdot (B/T \cdot \rho)); \quad (5)$$

$$\rho = \exp(15,556 - 8,601 \cdot (B/T) - 0,897 \cdot R - 6,555 \cdot (B/T)^2 + 0,421 \cdot (B/T \cdot R) + 0,030 \cdot R^2); \quad (6)$$

$$B/T = \exp(3,471 - 0,00566 \cdot \rho - 0,00377 \cdot R - 6,23 \cdot 10^{-7} \cdot \rho^2 + 0,000557 \cdot (\rho \cdot R) - 0,03296 \cdot R^2). \quad (7)$$

Для візуалізації результатів побудовано поверхні відгуку та 3D-поверхні залежностей, які дозволяють визначити оптимальні діапазони складу (рис. 4-6). Згідно з отриманими залежностями, оптимальна зона для конструкційно-теплоізоляційних сумішей становить:

- $B/T = 0,31-0,33$ ;
- $\rho = 1250-1450 \text{ кг/м}^3$ ;
- $R = 12-14 \text{ МПа}$ .

Поверхні відгуку на рис. 4 демонструють взаємозв'язок між водотвердим співвідношенням і середньою щільністю зразків та їхньою міцністю. Видно, що зі зниженням  $B/T$  до  $0,30-0,31$  міцність зростає до  $14-15 \text{ МПа}$  при щільності  $1650-1750 \text{ кг/м}^3$ . Водночас підвищення  $B/T$  понад  $0,33$  спричиняє різке падіння міцності до рівня нижче  $11 \text{ МПа}$ . Оптимальною виявилась область, де  $B/T$  становить  $0,31-0,33$ , щільність  $1250-1450 \text{ кг/м}^3$ , а міцність утримується у межах  $12-14 \text{ МПа}$ .

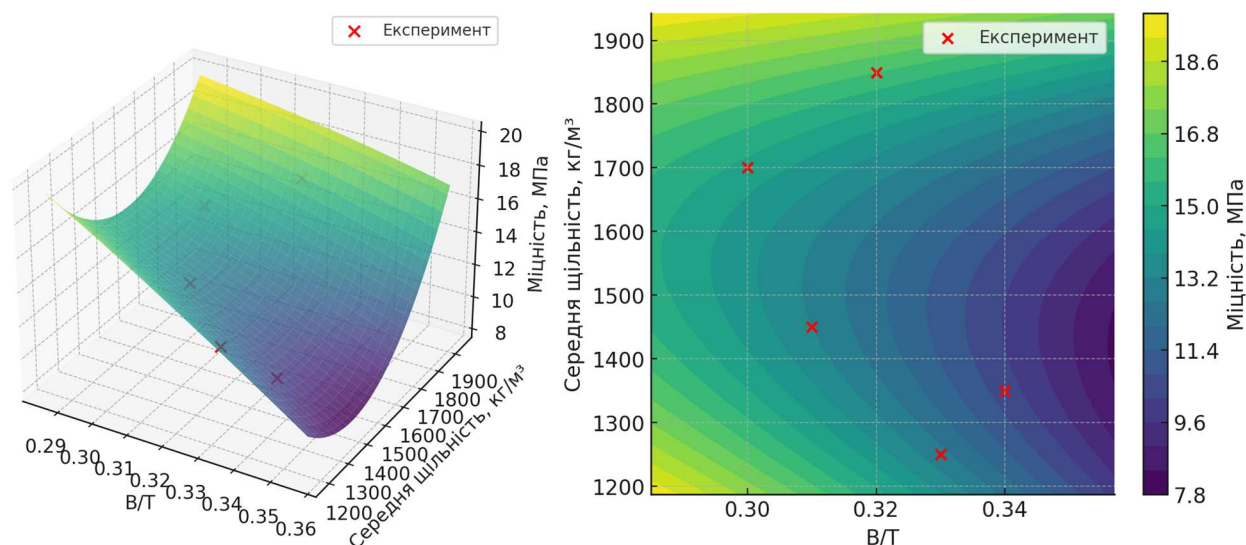


Рисунок 4 – Залежність міцності від  $B/T$  та середньої щільності

Поверхні відгуку на рис. 5 відображають вплив водотвердого співвідношення та міцності на щільність сумішей. При  $B/T = 0,31-0,33$  досягається зниження щільності до  $1250-1450 \text{ кг/м}^3$  без критичного падіння міцності. При нижчих значеннях  $B/T$  ( $\sim 0,30-0,31$ ) суміші зберігають більш високу щільність ( $>1600 \text{ кг/м}^3$ ), характерну для конструкційних матеріалів. Таким чином, область поділяється на два типи складів:

- теплоізоляційно-конструкційні (щільність  $1200-1450 \text{ кг/м}^3$ );
- важкі конструкційні (щільність понад  $1600 \text{ кг/м}^3$ ).



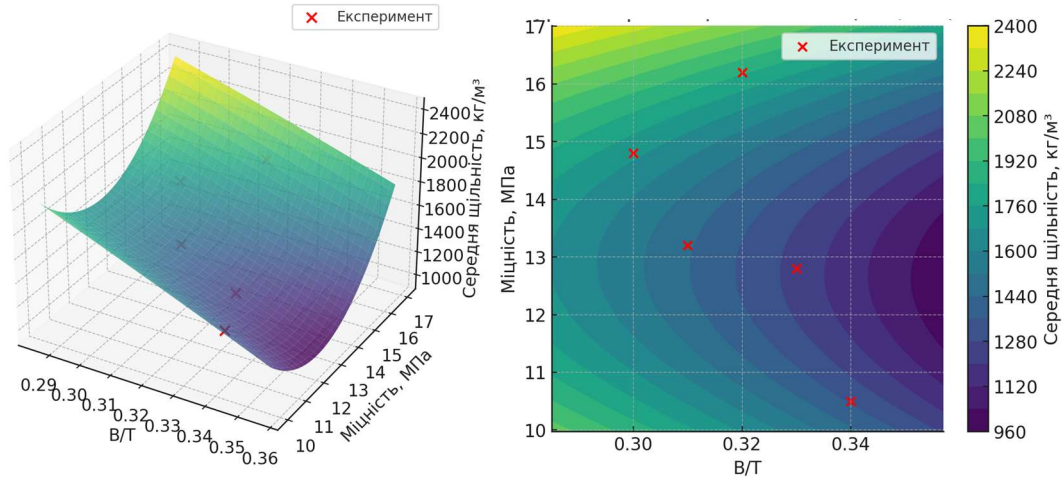


Рисунок 5 – Залежність щільності від В/Т та міцності

Отримані на рис. 6 поверхні відгуку показують залежність водотвердого співвідношення від середньої щільності та міцності. Найбільш оптимальні склади сконцентровані у зоні щільності 1250–1450 кг/м³ при міцності 12–14 МПа, що відповідає В/Т у межах 0,31–0,33. При збільшенні щільності понад 1700 кг/м³ та міцності вище 15 МПа для збереження властивостей необхідне зниження В/Т до ~0,30, але такі суміші поступаються легкістю та теплоізоляційними характеристиками.

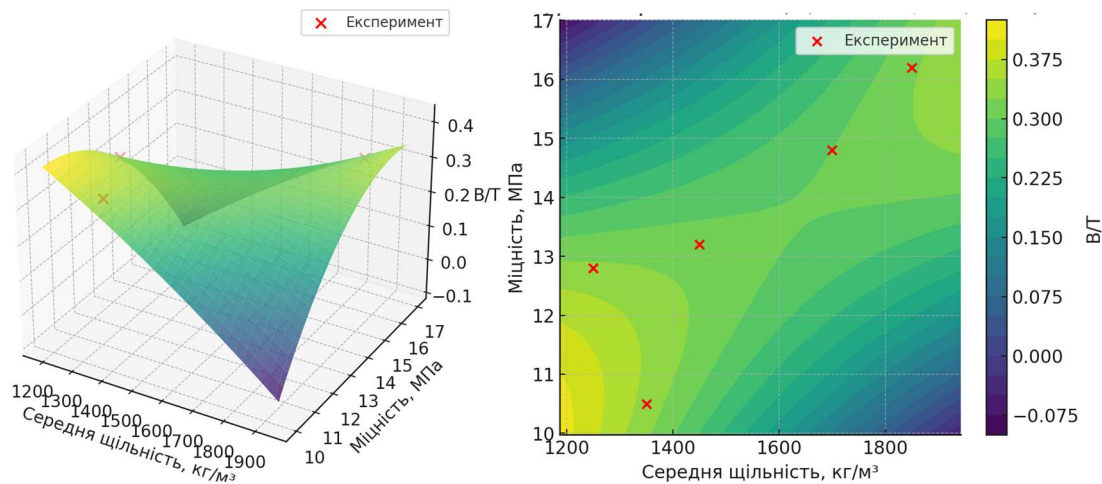


Рисунок 6 – Залежність В/Т від середньої щільності та міцності

Отримані результати досліджень дають змогу визначити оптимальну робочу область складів сухих будівельних сумішей, призначених для конструкційно-теплоізоляційних застосувань. Встановлено, що найраціональніші властивості суміші забезпечуються за таких параметрів:

- водотверде співвідношення (В/Т) = 0,31–0,33;
- середня щільність = 1250–1450 кг/м³;
- міцність на стиск = 12–14 МПа.

У цьому інтервалі досягається баланс між масою та експлуатаційними характеристиками: знижується густина матеріалу, що важливо для зменшення навантаження на несучі конструкції будівель, одночасно зберігається достатній рівень міцності, а також покращуються теплоізоляційні властивості.

Важливим є те, що оптимальна зона поєднує помірні значення В/Т з використанням легких заповнювачів, що сприяє формуванню дрібнопористої структури цементного каменю. Це забезпечує не лише механічну надійність, але й стабільність матеріалу під час тривалих експлуатаційних навантажень.

Застосування золи-винесення як активної мінеральної добавки сприяє вторинному використанню промислових відходів, знижує енергетичні витрати на виробництво сумішей і підвищує їх екологічність. Каменерізні відходи, введені до складу, виступають додатковим наповнювачем, який стабілізує щільність і формує компактнішу структуру. У поєднанні ці компоненти забезпечують синергетичний ефект: покращення міцності при зниженні середньої щільності.



Таким чином, результати дослідження підтверджують, що правильно підібрані комбінації легких заповнювачів і промислових відходів дозволяють отримати збалансовані рецептури сухих будівельних сумішей з прогнозованими властивостями. Це відкриває можливість їх широкого впровадження у практику будівництва для створення конструкційно-теплоізоляційних виробів, що поєднують екологічність, економічність та функціональність.

### Дослідження можливостей використання переробленого будівельного лому як альтернативи традиційним мінеральним заповнювачам

Перероблений будівельний лом, що утворюється при демонтажі конструкцій із бетону, цегли, кераміки та інших мінеральних матеріалів, є перспективним вторинним ресурсом у технологіях виготовлення сухих будівельних сумішей. Його застосування дозволяє зменшити обсяги відходів, що захоронюються на полігонах, і знизити потребу у видобутку природних заповнювачів.

Фізико-хімічні властивості будівельного лому визначаються вихідною природою матеріалу. Дослідження показали, що після дроблення та фракціонування будівельний лом має щільність у межах 1100–1600 кг/м<sup>3</sup>, високу пористість (15–25 %) та помірну водопоглинальність. Такі характеристики сприяють зменшенню середньої щільності сухих будівельних сумішей, проте можуть впливати на підвищення водопотреби.

Порівняння із традиційними мінеральними заповнювачами (кварцовим піском, вапняковим відсівом) показало, що будівельний лом може виконувати функцію легкого заповнювача, формуючи структуру матеріалу з підвищеною пористістю. За результатами експериментальних досліджень, введення до 20–30 % переробленого лому у склади з зола-винесенням дозволяє отримати міцність на рівні 12–14 МПа при середній щільності 1300–1450 кг/м<sup>3</sup>. Таким чином, перероблений будівельний лом доцільно використовувати як компонент конструкційно-теплоізоляційних сумішей, що забезпечує одночасно екологічні та економічні переваги.

Для практичного застосування сухих будівельних сумішей необхідно забезпечити баланс між міцністю, щільністю та теплоізоляційними властивостями. На основі проведених експериментів і регресійного моделювання визначено оптимальні комбінації компонентів, які формують універсальні склади СБС.

Оптимальна область параметрів знаходиться при  $B/T = 0,31–0,33$ , середній щільності 1250–1450 кг/м<sup>3</sup> та міцності 12–14 МПа. Досягнення таких характеристик можливе при поєднанні легких заповнювачів (перліту, будівельного лому) з активними мінеральними добавками (зола-винесення) і каменерізними відходами. Зола-винесення забезпечує пуцолановий ефект і ущільнення цементного каменю, тоді як легкі заповнювачі регулюють щільність і теплопровідність.

Побудовані поверхні відгуків підтверджують наявність «робочого діапазону», у межах якого поєднуються конструкційні та теплоізоляційні властивості. Використання будівельного лому як часткової заміни традиційного заповнювача дозволяє отримати суміші універсального призначення, придатні як для штукатурних і кладочних робіт, так і для виготовлення легких панелей (табл. 3).

Таблиця 3

#### Оптимальні комбінації компонентів для формування універсальних складів СБС

| № складу | Комбінація заповнювачів і добавок                       | $B/T$ | Середня щільність, кг/м <sup>3</sup> | Міцність на стиск, МПа | Характеристика складу                                                            |
|----------|---------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | Цемент + кварцовий пісок (контроль)                     | 0,32  | 1850                                 | 16,2                   | Важкий конструкційний склад, висока міцність, низькі теплоізоляційні властивості |
| 2        | Цемент + зола-винесення 20 %                            | 0,30  | 1700                                 | 14,8                   | Зменшення маси, добра оброблюваність, придатний для конструкційних розчинів      |
| 3        | Цемент + перліт 15 %                                    | 0,34  | 1350                                 | 10,5                   | Легкий склад, висока теплоізоляційність, знижена міцність                        |
| 4        | Цемент + зола-винесення 15 % + перліт 10 %              | 0,33  | 1250                                 | 12,8                   | Конструкційно-теплоізоляційний склад, оптимальне поєднання властивостей          |
| 5        | Цемент + зола-винесення 20 % + каменерізні відходи 10 % | 0,31  | 1450                                 | 13,2                   | Універсальний склад, збалансовані властивості, екологічність                     |
| 6        | Цемент + будівельний лом 20 % + зола-винесення 15 %     | 0,32  | 1400                                 | 12,5                   | Використання вторинної сировини, універсальне призначення, знижена вартість      |

Таким чином, визначення оптимальних комбінацій компонентів забезпечує науково обґрунтовану основу для проектування сухих будівельних сумішей нового покоління з підвищеною екологічною та економічною ефективністю.

Отже, дані досліджень, наведені у таблиці 3 та на рис. 7 узагальнюють результати експериментів і моделювання. Склади 4–6 знаходяться в оптимальній зоні ( $V/T = 0,31\text{--}0,33$ ;  $\rho = 1250\text{--}1450 \text{ кг/м}^3$ ;  $R = 12\text{--}14 \text{ МПа}$ ). Вони поєднують достатню міцність з малою масою та підвищеними теплоізоляційними властивостями. Найбільш перспективним є склад 6 із частковим використанням переробленого будівельного лому.

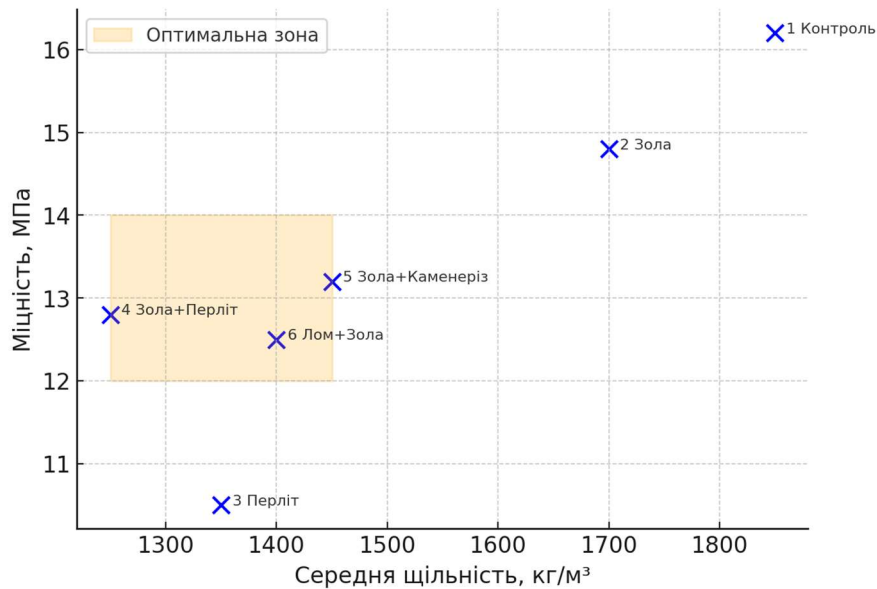


Рисунок 7 – Діаграма залежності міцності від середньої щільності для складів 1–6

На графіку 7 показано експериментальні значення для контрольного та модифікованих складів. Виділена оптимальна зона ( $\rho = 1250\text{--}1450 \text{ кг/м}^3$ ,  $R = 12\text{--}14 \text{ МПа}$ ) охоплює склади 4–6, що підтверджує доцільність використання комбінованих рецептур із золою-винесенням, перлітом та будівельним ломом. Саме ці склади забезпечують найкраще співвідношення міцності, щільності та теплоізоляційних властивостей.

## Висновки

У статті досліджено вплив легких заповнювачів та відходів промисловості на фізико-механічні властивості сухих будівельних сумішей. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень отримано такі результати:

1. Проаналізовано фізико-хімічні властивості легких заповнювачів і промислових відходів. Встановлено, що зола-винесення та каменерізні відходи мають активні пуцоланові властивості, тоді як перліт і перероблений будівельний лом забезпечують зниження середньої щільності та підвищення теплоізоляційних характеристик сумішей.

2. Експериментально визначено вплив складу сумішей на їхні властивості. Показано, що зменшення водотвердого співвідношення до  $0,30\text{--}0,31$  підвищує міцність до  $14\text{--}15 \text{ МПа}$ , тоді як надмірне зростання  $V/T$  (понад  $0,33$ ) знижує її нижче  $11 \text{ МПа}$ .

3. Побудовано регресійні моделі другого порядку. Отримані рівняння для міцності, середньої щільності та  $V/T$  дозволяють прогнозувати властивості сумішей при зміні складу, що підвищує можливості оптимізації рецептур.

4. Виконано побудову поверхонь відгуків і діаграм ізоліній. Встановлено робочий діапазон для конструкційно-теплоізоляційних складів:  $V/T = 0,31\text{--}0,33$ , середня щільність  $1250\text{--}1450 \text{ кг/м}^3$ , міцність  $12\text{--}14 \text{ МПа}$ .

5. Досліджено можливості використання переробленого будівельного лому. Показано, що введення до  $20\text{--}30 \%$  дробленого будівельного лому у комбінації з золою-винесенням забезпечує задовільні фізико-механічні показники при зниженій щільності.

6. Визначено оптимальні комбінації компонентів. Склади з комбінаціями золи-винесення, перліту та будівельного лому забезпечують збалансоване поєднання міцності, щільності та теплоізоляційних характеристик, що робить їх універсальними для використання в сучасному будівництві.

Таким чином, результати підтверджують перспективність використання легких заповнювачів і промислових відходів у складі сухих будівельних сумішей. Це дозволяє не лише знизити собівартість і масу матеріалів, а й вирішити екологічні завдання утилізації відходів, одночасно забезпечуючи надійність та довговічність будівельних конструкцій.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Л. Й. Дворкін, К. К. Пушкарьова, О. Л. Дворкін і М. О. Кочевих, «Використання техногенних продуктів у будівництві: навчальний посібник», Рівне: НУВГП, 2009, 330 с.
2. М. В. Суханевич, «Поводження з відходами та їх використання для одержання будівельних матеріалів: навчальний посібник», Київ: КНУБА, 2011, 152 с.
3. Ю. Г. Гасан, М. А. Мохорт і М. В. Суханевич, «Будівельні матеріали з відходів паливно-енергетичної, гірничо-видобувної та збагачувальної промисловості: конспект лекцій», Київ: КНУБА, 2009, 60 с.
4. Ю. Г. Гасан і М. А. Мохорт, «Переробка відходів чорної і кольорової металургії та паливної промисловості у будівельні матеріали: конспект лекцій», Київ: КНУБА, 2008, 44 с.
5. А. В. Бондар, В. П. Ковальський, В. П. Бурлаков, та Є. Р. Матвійчук, «Утилізація відходів промисловості шляхом виготовлення на їх основі сухих будівельних сумішей», Екологічні науки: науково-практичний журнал, № 3 (22), с. 21–24, 2018.
6. О. В. Бондар, О. В. Христин, «Проектування складів сухих будівельних сумішей з відходами промисловості і будівельними відходами», Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві, Том 37 № 2, с. 52–59, 2024.
7. Л. Й. Дворкін і А. В. Мироненко, «Будівельні матеріали та вироби із застосуванням промислових відходів: навчальний посібник», Рівне: НУВГП, 2019, 298 с.
8. Л. Й. Дворкін, В. В. Житковський і В. В. Марчук, «Ефективні сухі будівельні суміші та розчини на їх основі: монографія», Київ: Каравела, 2024, 348 с.
9. А. В. Бондар, Н. Ю. Іродова і О. В. Бондар, «Ефективність використання місцевих матеріалів та відходів промисловості для виготовлення сухих будівельних сумішей», LIV Всеукраїнська науково-технічна конференція факультету будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінниця, 24–27 березня 2025 р. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2025/paper/view/24493/20245>
10. ДСТУ Б В.2.7-126:2011. Суміші будівельні сухі модифіковані. Загальні технічні умови. Чинний від 2011-06-01. Вид. офіц. К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2011. 42 с.

## REFERENCES

1. L. Y. Dvorkin, K. K. Pushkaryova, O. L. Dvorkin, and M. O. Kochevykh, "Use of Technogenic Products in Construction: Textbook," Rivne: NUVHP, 2009, 330 p.
2. M. V. Sukhaneych, "Waste Management and Its Use for Producing Construction Materials: Textbook," Kyiv: KNUBA, 2011, 152 p.
3. Y. G. Hasan, M. A. Mokhort, and M. V. Sukhaneych, "Building Materials from Waste of the Fuel-Energy, Mining, and Processing Industries: Lecture Notes," Kyiv: KNUBA, 2009, 60 p.
4. Y. G. Hasan and M. A. Mokhort, "Recycling Waste from Ferrous and Non-Ferrous Metallurgy and the Fuel Industry into Construction Materials: Lecture Notes," Kyiv: KNUBA, 2008, 44 p.
5. A. V. Bondar, V. P. Kovalskyi, V. P. Burlakov, and Ye. R. Matviychuk, "Utilization of Industrial Waste by Manufacturing Dry Building Mixtures," Ecological Sciences: Scientific and Practical Journal, no. 3 (22), pp. 21–24, 2018.
6. O. V. Bondar, O. V. Khryshch, "Design of Dry Building Mixes with Industrial and Construction Waste", Modern Technologies, Materials and Structures in Construction, Vol. 37, No. 2, pp. 52–59, 2024.
7. L. Y. Dvorkin and A. V. Mironenko, "Building Materials and Products Using Industrial Waste: Textbook," Rivne: NUVHP, 2019, 298 p.
8. L. Y. Dvorkin, V. V. Zhitkovskiy, and V. V. Marchuk, "Efficient Dry Building Mixtures and Mortars Based on Them: Monograph," Kyiv: Karavela, 2024, 348 p.
9. A. V. Bondar, N. Y. Irodova, and O. V. Bondar, "Efficiency of Using Local Materials and Industrial Waste for the Production of Dry Building Mixtures," LIV All-Ukrainian Scientific and Technical Conference of the Faculty of Civil, Construction and Environmental Engineering, Vinnytsia, Ukraine, March 24–27, 2025. [Online]. Available: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2025/paper/view/24493/20245>
10. DSTU B V.2.7-126:2011. Modified Dry Building Mixtures. General Technical Specifications. Effective from 2011-06-01. Official ed. Kyiv: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine, 2011, 42 p.

**Бондар Олександр Васильович** – аспірант кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [alexbondar.phdoc@gmail.com](mailto:alexbondar.phdoc@gmail.com)

**O. Bondar**

# INFLUENCE OF LIGHTWEIGHT AGGREGATES AND INDUSTRIAL WASTE ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF DRY BUILDING MIXTURES

Vinnitsia National Technical University

*The article presents the results of a study on the influence of lightweight aggregates and industrial waste on the physical and mechanical properties of dry building mixtures (DBMs). The research problem is determined by the need to introduce environmentally safe and resource-efficient technologies in modern construction, which requires replacing part of the traditional mineral components with secondary resources. Perlite, vermiculite, and expanded clay sand were used as lightweight aggregates, while fly ash, granulated blast furnace slag, cement kiln dust, and stone-cutting waste were applied as industrial by-products. The water-to-binder ratio, bulk density, and compressive strength at 28 days were determined. Regression modeling was employed to establish quantitative relationships between mixture composition and properties. It was found that the introduction of perlite or vermiculite in the amount of 10-15% reduces the density by 18-25%, providing thermal insulation properties while maintaining compressive strength at the level of 10-13 MPa.*

*The addition of fly ash in the amount of 20-25% ensures an optimal water-to-binder ratio and improves crack resistance. The combined use of fly ash with stone-cutting waste (5-10%) enhances structure formation and maintains strength at 12-13 MPa. Special attention was given to recycled aggregates obtained from construction and demolition waste. The study demonstrated that recycled concrete and reinforced concrete meet national standards and allow the production of C16/20 class concretes. Therefore, the combination of lightweight aggregates, industrial by-products, and recycled fractions enables the production of universal DBMs with densities ranging from 1200 to 2300 kg/m<sup>3</sup> for various applications – from finishing and insulating to structural mixtures. The proposed approach contributes to reducing natural resource consumption, lowering production costs, and addressing the problem of construction waste recycling.*

**Key words:** dry building mixtures, lightweight aggregates, fly ash, industrial waste, construction waste recycling, physical and mechanical properties, mix optimization.

O  
l  
e  
k  
s  
a  
n  
d  
r  
V  
.  
—  
P  
o  
s  
t  
g  
r  
a  
d  
u  
a  
t  
e  
  
s  
t  
u  
d  
e  
n  
t  
  
o  
f