

О. В. Бондар
О. В. Христич
К. В. Гігінешвілі

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ ПРОМИСЛОВОСТІ ТА БУДІВНИЦТВА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА СУХИХ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ

Вінницький національний технічний університет

У статті представлено результати теоретичних і експериментальних досліджень ефективності використання відходів промисловості та будівництва для виробництва сухих будівельних сумішей (СБС). Досліджено фізико-хімічні властивості золи-винесення ТЕС, доменних шлаків, бетонного та цегляного бою, їх вплив на реологічні характеристики, міцність і експлуатаційні властивості СБС. Проведено розробку оптимальних складів сумішей із використанням вторинної сировини, що дозволяють досягти збалансованого поєднання технічних характеристик, економічної ефективності та екологічної безпеки. Експериментально підтверджено, що вторинні компоненти здатні формувати щільну структуру цементного каменю, підвищувати тріщиностійкість, зменшувати водопоглинання та підвищувати міцність на стиск і згин. Показано, що включення до 30% промислових і будівельних відходів дозволяє знизити вуглецевий слід виробництва СБС на 15–20%, скоротити споживання природної сировини та обсяги утворення відходів. Запропоновано технологічну схему підготовки вторинних матеріалів і рецептури сумішей на їх основі. Виявлено оптимальні співвідношення вторинних компонентів (зола-винесення, бетонний та цегляний бій), які забезпечують максимальну ефективність за комплексом фізико-механічних властивостей. Результати досліджень доводять доцільність широкого впровадження вторинної сировини у виробництво СБС в умовах сталого розвитку будівельної галузі. Окремо розглянуто екологічні та економічні переваги запропонованого підходу, визначено напрями подальших досліджень щодо удосконалення складів СБС залежно від регіональної сировинної бази.

Ключові слова: сухі будівельні суміші, промислові відходи, зола-винесення, бетонний бій, вторинна сировина, мінеральні наповнювачі, реологія, міцність, екологічна ефективність, сталий розвиток.

Вступ

Сучасні вимоги до будівельних матеріалів включають не лише високі технічні характеристики, а й екологічну безпечність, економічну доцільність та ресурсощадність. У цьому контексті особливого значення набуває використання відходів промисловості та будівництва як вторинної сировини у виробництві сухих будівельних сумішей. Такий підхід дозволяє зменшити екологічне навантаження на довкілля та одночасно оптимізувати технологічні процеси виробництва СБС.

Відходи, що утворюються у процесах виробництва енергії, металургії, видобутку та переробки корисних копалин, а також демонтажу будівель, мають значний потенціал як мінеральні компоненти СБС. Зокрема, зола-винесення теплових електростанцій, доменні шлаки, відсів щебеню, подрібнений бетонний та цегляний бій є перспективними наповнювачами або активними добавками [1-5].

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування та експериментальна перевірка ефективності використання відходів промисловості та будівництва у виробництві СБС, оцінка їх впливу на властивості сумішей і розробка оптимальних рецептур із урахуванням техніко-економічних та екологічних показників.

Завдання дослідження:

- Вивчити фізико-хімічні властивості промислових та будівельних відходів.
- Визначити їх вплив на реологічні, міцнісні та експлуатаційні властивості СБС.
- Розробити експериментальні склади СБС з різними видами відходів.
- Проаналізувати ефективність заміщення традиційних мінеральних компонентів відходами.
- Оцінити екологічну та економічну доцільність використання вторинної сировини.

Теоретичні передумови використання відходів

Використання відходів як компонента СБС базується на принципах циркулярної економіки, де кожен відхід розглядається як ресурс. Зола-винесення, доменні шлаки, цементний пил, подрібнений бетон і цегляний бій мають в'язучі або заповнювальні властивості, що дозволяє їх ефективно інтегрувати у цементно-піщані композиції. Застосування таких компонентів потребує відповідної активації (механічної, термічної або хімічної), але в результаті забезпечує підвищення міцності, зниження усадки, покращення адгезії та водоутримувальної здатності сумішей [6-7].

Науково обґрунтовано, що тонкодисперсні залишки згорання (зола, шлак) можуть проявляти пуцоланову активність, вступаючи в хімічну взаємодію з продуктами гідратації цементу [1, 3-4]. Це дозволяє формувати додаткові кристалічні фази, що ущільнюють структуру і підвищують довговічність суміші. Водночас тверді відходи будівництва (бетонний та цегляний бій) при належному

подрібненні виступають як ефективний заповнювач, що підвищує щільність структури та зменшує кількість пор [1] (рис. 1-2).

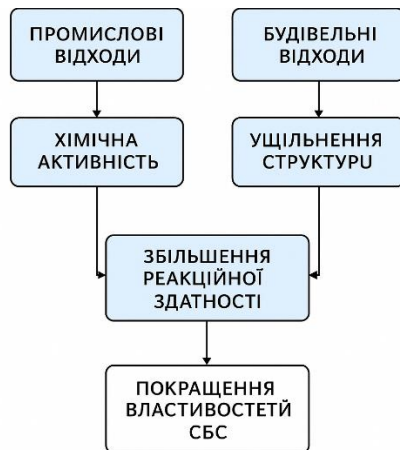


Рисунок 1 – Використання відходів для виробництва СБС

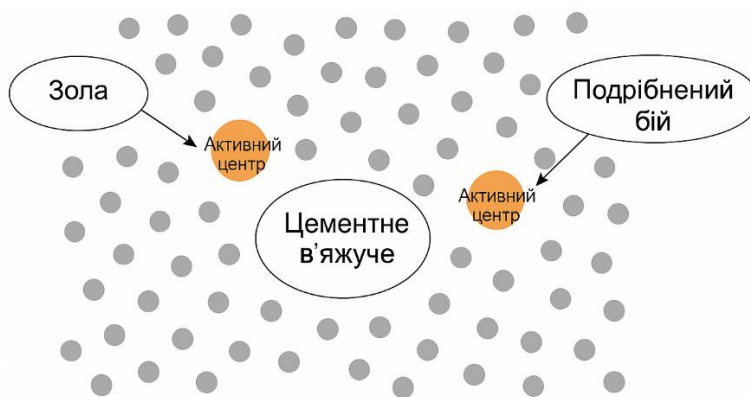


Рисунок 2 – Схема взаємодії компонентів суміші на основі вторинної сировини

Теоретичні моделі підтверджують, що наявність у складі СБС активованих мінеральних компонентів сприяє покращенню реакційної здатності суміші, забезпечує зростання питомої поверхні та збільшення ступеня гідратації в'язучого [7-9]. Ці зміни позитивно позначаються на структурно-механічних властивостях сумішей, зокрема, на тріщиностійкості, адгезійній здатності, морозостійкості та водопоглинанні.

Мікроструктурний аналіз виявив наявність щільної гелеподібної фази С-S-H та зменшення пористості. Результати термограм засвідчили посилення гідратації цементу при наявності активованих компонентів, що підтверджує ефективність застосування вторинної сировини [1-8]. На рис. 2 наведено схему взаємодії компонентів суміші на основі вторинної сировини: активні центри золи та подрібненого бою сприяють формуванню щільнішої цементної матриці (рис. 3).

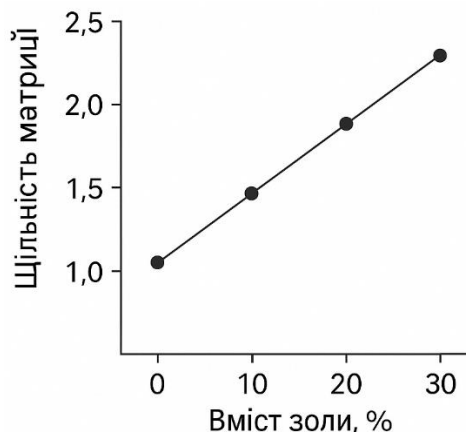


Рисунок 3 – Вплив золи-винесення на щільність цементної матриці

Включення вторинної сировини у СБС також дозволяє зменшити екологічні ризики, пов'язані з

накопиченням відходів, скороченням природних ресурсів і енергетичними витратами на видобуток та транспортування природних матеріалів [10].

Застосування промислових та будівельних відходів у якості компонентів СБС дозволяє суттєво скоротити обсяги утворення відходів, що накопичуються на полігонах, зменшити потребу у видобутку природних нерудних матеріалів і тим самим знизити антропогенне навантаження на навколишнє середовище. Зокрема, використання 1 тони золи-винесення замість кварцового піску дозволяє заощадити близько 0,8 тони природної сировини і скоротити викиди CO_2 на 7-10 % [1, 4].

Енергетичні витрати на підготовку вторинних компонентів (сушіння, подрібнення, фракціонування) є значно нижчими порівняно з повним циклом видобутку та обробки первинних матеріалів. У результаті оцінки життєвого циклу продукції встановлено, що використання вторинної сировини знижує загальний вуглецевий слід сухих сумішей до 15-20 %.

Крім того, зменшення кількості відходів, які підлягають захороненню, сприяє зниженню рівня забруднення ґрунтів та підземних вод важкими металами й солями. Таким чином, запропонований підхід сприяє реалізації принципів циркулярної економіки та сталого будівництва.

На схемі на рис. 4 представлено послідовність основних етапів інтеграції промислових і будівельних відходів у процес виробництва сухих будівельних сумішей (СБС) [11]. Після початкового збору та сортування відходи за походженням (промислові або будівельні) піддаються етапу подрібнення для зменшення розміру частинок і підвищення їх реакційної здатності. Наступний етап класифікації передбачає розподіл отриманого матеріалу за гранулометричними характеристиками з метою забезпечення стабільності складу сумішей.

Далі здійснюється механічна та/або хімічна активація, спрямована на підвищення пуцоланової активності та поліпшення сумісності відходів із в'язкими матеріалами. Механічна активація включає інтенсивне подрібнення для збільшення питомої поверхні частинок, а хімічна – модифікацію структури матеріалу шляхом обробки активуючими речовинами [1, 10].

Після проходження цих етапів оброблені відходи стають повноцінними компонентами рецептур СБС і можуть замінювати або доповнювати традиційні мінеральні наповнювачі. Такий підхід дозволяє значно зменшити споживання первинної сировини, знизити енергетичні витрати виробництва, а також сприяє реалізації принципів циркулярної економіки та сталого розвитку у будівельній галузі.

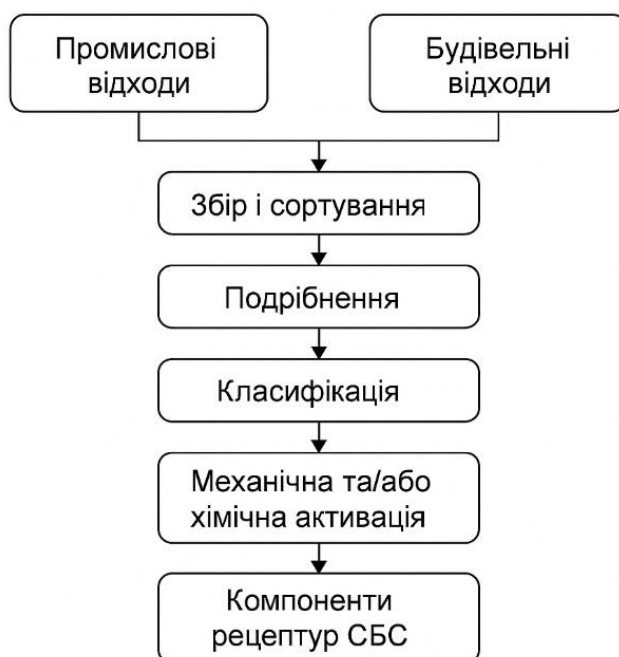


Рисунок 4 – Технологічна схема використання відходів у виробництві СБС

Матеріали, методи та результати дослідження

Для проведення досліджень використовували портландцемент ПЦ І-500, промислову золу-винесення ТЕС, подрібнений бетонний та цегляний бій, а також кварцовий і вапняковий пісок як заповнювачі. З метою покращення реологічних властивостей додавали редиспергуючі полімерні порошки, ефір целюлози та поліпропіленову фібру. Всі компоненти ретельно висушували, просівали та змішували у сухому стані в лабораторному міксері.

Суміші формували згідно з ДСТУ Б В.2.7-126:2011 [12] у вигляді балочок 40×40×160 мм, які

витримували 28 діб у нормальних умовах. Визначали рухомість (метод занурення конуса), розтічність, міцність на стиск і згин, а також середню щільність, водоутримувальну здатність і час схоплювання.

У таблиці 1 наведено порівняльні характеристики сумішей із використанням різних типів вторинної сировини. Найвищу міцність показали зразки із золою-виносом, що вказує на її позитивний вплив як активного мінерального наповнювача.

Таблиця 1

Вплив типу вторинної сировини на характеристики суміші

Тип відходу	Дозування, %	Міцність при стиску, МПа	Водоутримання, %	Щільність, кг/м ³
Зола-винос	15	13,8	96	1450
Доменний шлак	10	12,5	95	1480
Подрібнений бетон	30	11,9	92	1510
Контрольний зразок	-	11,4	93	1470

У таблиці 2 наведено рецептури чотирьох варіантів сухих будівельних сумішей, які включають різні комбінації промислових та будівельних відходів: золи-виносу, бетонного та цегляного бою. Представлені масові частки основних компонентів (портландцемент, пісок, вторинні наповнювачі), а також добавки – полімерний порошок (RPP), ефір целюлози (ЕС) та поліпропіленова фібра (ФП). Метою таблиці є порівняння змін у складі та встановлення впливу типу і кількості відходів на технологічні властивості сумішей.

У таблиці 3 представлено порівняння основних фізико-механічних характеристик сумішей, наведених у таблиці 2. Включено водоцементне відношення (В/Т), рухомість, розтічність, міцність на стиск ($R_{ст.}$), міцність на згин ($R_{зг.}$) та середню густину (ρ_m). Дані свідчать про зміну реологічних та міцнісних показників в залежності від складу та співвідношення вторинних компонентів у суміші, що дозволяє оцінити ефективність їх використання в якості функціональних мінеральних наповнювачів.

Таблиця 2

Склади СБС з відходами та модифікуючими добавками

№	ПЦ, кг	Пісок, кг	Зола, кг	Бетонний бій, кг	Цегляний бій, кг	RPP, %	ЕС, %	ФП, кг/м ³
1	210	150	90	–	–	2	0,3	0,2
2	210	100	90	50	–	2	0,3	0,2
3	210	100	50	50	40	2	0,3	0,2
4	210	80	50	40	50	2	0,3	0,2

Таблиця 3

Фізико-механічні властивості сумішей

№	В/Т	Рухомість, см	Розтічність, см	$R_{ст.}$, МПа	$R_{зг.}$, МПа	ρ_m , кг/м ³
1	0,30	8,5	13,0	7,8	3,2	950
2	0,28	9,0	14,2	8,1	3,5	930
3	0,27	9,5	15,1	8,3	3,7	915
4	0,26	10,0	15,8	8,0	3,5	900

З аналізу таблиці 2 видно, що введення вторинних компонентів знижує водоцементне відношення при одночасному зростанні рухомості та розтічності сумішей. Найвищу міцність на стиск (8,3 МПа) та згин (3,7 МПа) отримано у варіанті з комбінованим введенням золи, бетонного та цегляного бою. Це свідчить про синергетичну дію різних видів відходів за рахунок різної дисперсності та хімічної активності.

Експериментально підтверджено, що введення золи-виносу у кількості до 25 % сприяє зменшенню водоцементного відношення та підвищенню рухомості сумішей до 15 %. При цьому міцність на стиск зразків з використанням 20 % золи зросла на 5-8 % у порівнянні з контрольними сумішами (рис. 5).

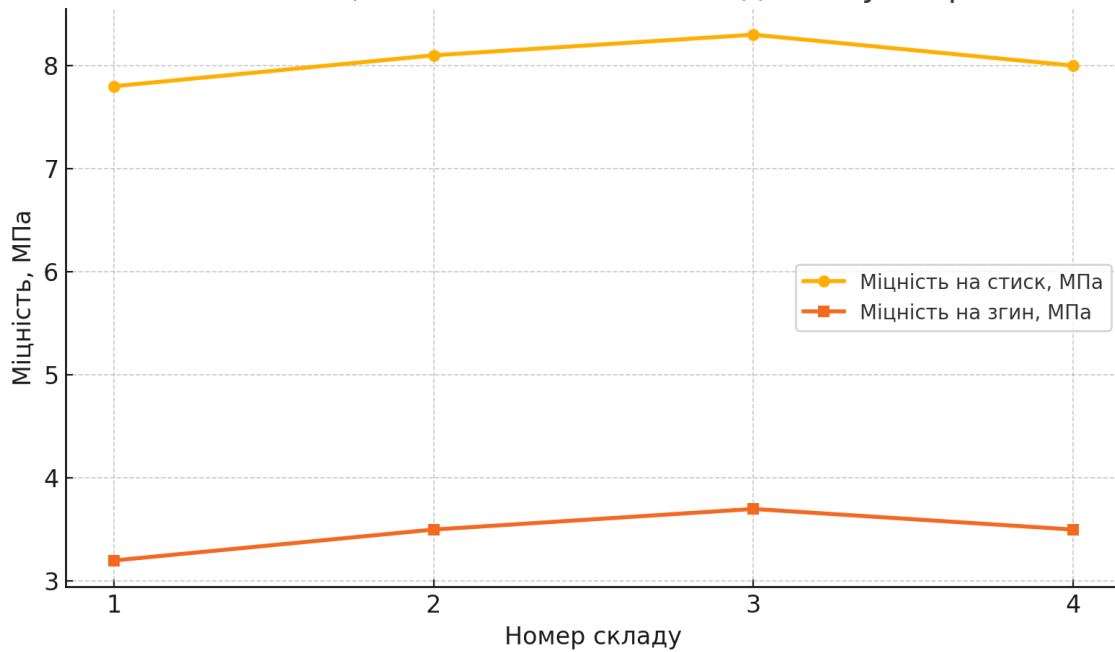


Рисунок 5 – Залежність міцності на стиск і згин від вмісту вторинних компонентів

Заміна 30-50 % заповнювача на подрібнений бетонний і цегляний бій призвела до незначного зниження густини (рис. 6), але підвищила міцність на згин до 3,7 МПа. Оптимальні характеристики спостерігались у композиціях, де поєднувалися зола, бетонний та цегляний бій у співвідношенні 1:1:1. Такі рецептури забезпечили максимальну щільність структури, мінімальну усадку та добру адгезію до основи.

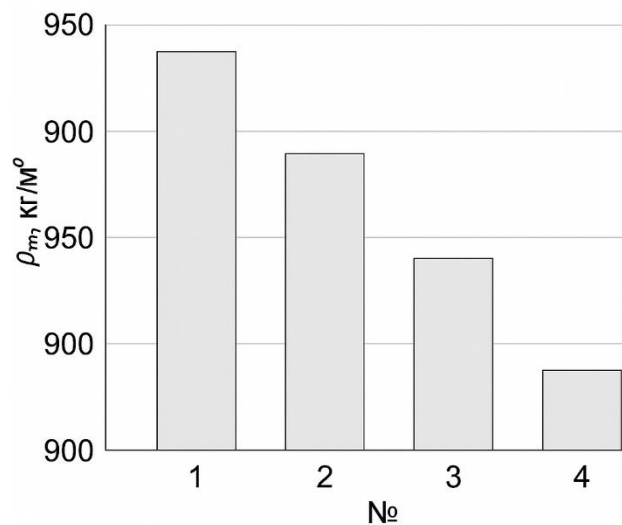


Рисунок 6 – Вплив складу СБС на середню густину розчину

У ході досліджень визначено такі значення основних технічних характеристик для дослідних складів СБС:

- Рухомість сумішей варіювала в межах 8,5–10,0 см;
- Розтічність становила 13,0–15,8 см;
- Водоцементне відношення зменшувалося від 0,30 до 0,26 зі зростанням частки вторинних компонентів;
- Міцність на стиск досягала 8,3 МПа, що на 5–8 % вище порівняно з контрольним складом;
- Міцність на згин становила 3,2–3,7 МПа залежно від варіанту рецептури;
- Середня щільність затверділих сумішей знаходилася в діапазоні 900–950 кг/м³.

Отримані дані підтверджують ефективність використання техногенних відходів у СБС як повноцінних функціональних наповнювачів, які не лише не погіршують, а й покращують низку важливих технічних характеристик.

Таким чином, результати досліджень свідчать про можливість широкого застосування техногенних відходів у виробництві СБС без втрати експлуатаційних властивостей і з істотними екологічними перевагами.

Висновки

1. Встановлено, що відходи промисловості (зола-винесення ТЕС) та будівництва (бетонний і цегляний бій) можуть бути ефективно використані як мінеральні компоненти сухих будівельних сумішей без зниження їх експлуатаційних властивостей.
2. Визначено, що оптимальні фізико-механічні показники досягаються при комплексному введенні вторинних матеріалів у співвідношенні 1:1:1, що забезпечує щільну структуру, підвищену міцність на згин і стиск, а також зниження водоцементного відношення.
3. Здійснено порівняльний аналіз складів СБС з різними комбінаціями вторинної сировини, який дозволив обґрунтувати найбільш ефективні рецептури за сукупністю показників міцності, реології та щільності.
4. Проведено оцінку екологічних показників: встановлено, що використання техногенних відходів дозволяє зменшити вуглецевий слід виробництва СБС до 20 %, а також скоротити обсяги захоронення відходів і використання природних ресурсів.
5. Запропоновано подальші напрями досліджень, які передбачають адаптацію рецептур до регіональної сировинної бази, розширення номенклатури використовуваних відходів та інтеграцію принципів сталого будівництва на усіх етапах виробництва СБС.

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. Л. Й. Дворкін і А. В. Мироненко, «Будівельні матеріали та вироби із застосуванням промислових відходів: навчальний посібник», Рівне: НУВГП, 2019, 298 с.
6. К. К. Пушкарьова (ред.), «Сучасні українські будівельні матеріали, вироби та конструкції: науково-практичний довідник», Київ: Асоціація «ВСВБМВ», 2012, 664 с.
7. 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.
8. Р. Ф. Рунова, та Ю. Л. Носовский, Технологія модифікованих будівельних розчинів. Київ, Україна: КНУБА, 2007.
9. А. В. Бондар, «Ефективні сухі будівельні суміші для елементів підлог цивільних будівель», дис. канд. наук.; Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2019.
10. А. В. Бондар, В. П. Ковальський, В. П. Бурлаков, та С. Р. Матвійчук, «Утилізація відходів промисловості шляхом виготовлення на їх основі сухих будівельних сумішей», Екологічні науки: науково-практичний журнал, № 3 (22), с. 21-24, 2018.
11. 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>
12. 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. Sukhanevych, "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. Sukhanevych, "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. L. Y. Dvorkin and A. V. Mironenko, "Building Materials and Products Using Industrial Waste: Textbook," Rivne: NUVHP, 2019, 298 p.
6. K. K. Pushkaryova (Ed.), "Modern Ukrainian Building Materials, Products, and Structures: Scientific and Practical Reference Book," Kyiv: Association "VSVBMV," 2012, 664 p.
7. L. Y. Dvorkin, V. V. Zhitkovskyi, and V. V. Marchuk, "Efficient Dry Building Mixtures and Mortars Based on Them: Monograph," Kyiv: Karavela, 2024, 348 p.

8. R. F. Runova and Y. L. Nosovsky, "Technology of Modified Building Mortars," Kyiv, Ukraine: KNUBA, 2007.
9. A. V. Bondar, "Effective Dry Building Mixtures for Flooring Elements of Civil Buildings," Ph.D. dissertation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2019.
10. 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.
11. 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>
12. 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.

Христич Олександр Володимирович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця. e-mail: dockhrystich@i.ua. ORCID: 0000-0003-0166-547X.

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

Гігінеїшвілі Карло Володимирович – аспірант кафедри будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету. E-mail: kshvili@gmail.com.

O. Bondar
O. Khrystych
K. Hihineishvili

EFFICIENCY OF INDUSTRIAL AND CONSTRUCTION WASTE UTILIZATION IN THE PRODUCTION OF DRY BUILDING MIXTURES

Vinnytsia National Technical University

The article presents the results of theoretical and experimental research on the effectiveness of utilizing industrial and construction waste for the production of dry building mixtures (DBM). The physical and chemical properties of fly ash from thermal power plants, blast furnace slag, crushed concrete, and brick debris were studied, along with their influence on the rheological properties, strength, and performance characteristics of DBM. Optimal mixture compositions using secondary raw materials were developed, achieving a balance between technical properties, economic efficiency, and environmental sustainability. Experimental results confirmed that secondary components contribute to forming a dense cement matrix, increasing crack resistance, reducing water absorption, and enhancing compressive and flexural strength. It was demonstrated that the inclusion of up to 30% industrial and construction waste can reduce the carbon footprint of DBM production by 15–20%, decrease the consumption of natural resources, and minimize waste generation. A technological scheme for the preparation of secondary materials and formulations based on them was proposed. Optimal ratios of secondary components (fly ash, crushed concrete, and brick debris) were identified to ensure maximum efficiency in terms of physical and mechanical properties. The research results justify the widespread use of secondary raw materials in DBM production in the context of sustainable construction industry development. Additionally, the ecological and economic benefits of the proposed approach are discussed, and directions for further research are outlined to improve mixture compositions based on the regional raw material base.

Key words: dry building mixtures, industrial waste, fly ash, crushed concrete, secondary raw materials, mineral components of the mixture, rheology, strength, environmental efficiency, sustainable development.

Bondar Oleksandr V. – Postgraduate student of the Department of Construction, Urban Planning and Architecture Vinnytsia National Technical University, e-mail: alexbondar.phdoc@gmail.com.

Khrystych Oleksandr V. – associate professor, associate professor of the Department of Construction, Urban Planning and Architecture Vinnytsia National Technical University, Vinnytsya. e-mail: dockhrystich@i.ua. ORCID: 0000-0003-0166-547X.

Karlo Hihineishvili – Postgraduate Department of Department of Construction, Urban Management and Architecture, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: hihineishvili@gmail.com.