ЕКОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА

УДК 622.271;504.064;691.5
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.6-69.19

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ТА РЕСУРСНА ВАЛОРИЗАЦІЯ КАМЕНЕОБРОБНОЇ ПУЛЬПИ ГОЛОВИНСЬКОГО РОДОВИЩА

Наумов Я.О. (orcid.org/0009-0004-3777-7814)
Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська 103, 10005, м. Житомир
kgttb_nyao@ztu.edu.ua

Під час обробки природного каменю утворюються дрібнодисперсні відходи у вигляді пульпи, накопичення яких змушує шукати екологічно безпечні способи переробки або залучати його до повторного використання. Перспективним напрямом є використання каменеобробної пульпи для виробництва будівельних матеріалів, але через нерівномірність її складу необхідно проведення аналітичної оцінки. Досліджено повний WDXRF-профіль восьми проб дрібнодисперсної каменеобробної пульпи Головинського родовища. Для кожного показника визначено вміст SiO_2, TiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, MnO, CaO, K_2O, Na_2O, P_2O_5, LOI та контрольну аналітичну суму Summ. Концентрація SiO_2 становить 52,71-72,02 %, Al_2O_3 12,55-19,32 %, Fe_2O_3 4,41-13,65 %, CaO 0,98-10,48 %. Додатково розраховано узагальнені показники: $SiO_2+Al_2O_3$, Na_2O+K_2O, CaO+MgO та валове молярне співвідношення Si/Al.

Найбільша відносна мінливість у досліджені має P_2O_5, K_2O, CaO, втрати під час прожарювання (LOI), MgO та MnO. Проба 7L вирізняється хімічним профілем, який відмінний від більшості інших проб, тоді як 6L і 6_1L характеризується підвищеним сумарним вмістом кальцієвих та магнієвих оксидів.

Для оцінювання теоретичної маси сухої пульпи та оксидних компонентів запропоновано матеріально-балансові співвідношення. Отримані дані придатні для попереднього групування партій пульпи та планування технологічних випробувань агломерованого каменю та лужно-активованих матеріалів. Але при цьому метод WDXRF не дозволяє визначити мінеральні фази, міграційну здатність потенційно небезпечних елементів чи рівень токсичності. Тому результати необхідно розглядати як початковий етап оцінювання ресурсного потенціалу, а не як підтвердження екологічної безпечності виготовлених виробів.

Також отримані результати показують, що каменеобробна пульпа Головинського родовища має неоднорідний хімічний склад, який необхідно враховувати під час її подальшого використання. Відмінності у вмісті основних оксидних компонентів свідчать про необхідність попереднього аналізу окремих партій пульпи, оскільки їх властивості можуть впливати на вибір технології виготовлення будівельних матеріалів. Використання таких відходів як вторинної сировини, також може зменшити потребу у природних мінеральних ресурсах та скоротити обсяги їх накопичення на підприємствах. При цьому для визначення доцільності такого використання необхідно провести додаткові дослідження, які дозволять оцінити не лише фізико-механічні характеристики, але й їхню екологічну безпечність. *Ключові слова:* каменеобробна пульпа; Головинське родовище; WDXRF; оксидний склад; вторинна сировина; агломерований камінь; геополімер; вилуговування.

Environmental assessment and resource valorisation of stone-processing slurry from the Holovyne deposit. Naumov Ya.

During natural stone processing, fine-grained waste is generated in the form of slurry, the accumulation of which necessitates the development of environmentally safe processing methods or its reuse. One promising approach is the use of stone-processing slurry in the production of building materials. However, due to the heterogeneity of its composition, an analytical assessment is required.

The complete wavelength-dispersive X-ray fluorescence (WDXRF) profiles of eight samples of fine-grained stone-processing slurry from the Holovyne deposit were investigated. The contents of SiO_2, TiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, MnO, CaO, K_2O, Na_2O, P_2O_5, loss on ignition (LOI), and the control analytical sum (Summ) were determined for each sample. The SiO_2 content ranged from 52.71 to 72.02%, Al_2O_3 from 12.55 to 19.32%, Fe_2O_3 from 4.41 to 13.65%, and CaO from 0.98 to 10.48%. In addition, the following combined indicators were calculated: $SiO_2+Al_2O_3$, Na_2O+K_2O, CaO+MgO, and the bulk molar Si/Al ratio. The highest relative variability was observed for P_2O_5, K_2O, CaO, loss on ignition (LOI), MgO, and MnO. Sample 7L exhibited a chemical profile that differed from those of most other samples, whereas samples 6L and 6_1L were characterised by elevated combined contents of calcium and magnesium oxides.

Material balance relationships were proposed to estimate the theoretical mass of dry slurry and its constituent oxides. The obtained data can be used for the preliminary grouping of slurry batches and the planning of technological tests involving agglomerated stone and alkali-activated materials. However, the WDXRF method does not allow the identification of mineral phases, the assessment of the migration potential of potentially hazardous elements, or the determination of toxicity levels. Therefore, the results should be regarded as an initial stage in assessing the resource potential of the slurry rather than as confirmation of the environmental safety of the manufactured products.

Also the obtained results indicate that stone-processing slurry from the Holovyne deposit has a heterogeneous chemical composition that must be taken into account when considering its further use. Differences in the contents of the main oxide components highlight the need for preliminary analysis of individual slurry batches, as their properties may influence the choice of technology for manufacturing building materials. The use of such waste as a secondary raw material may also reduce the demand for natural mineral resources and decrease the amount of waste accumulated at industrial enterprises. Nevertheless, further research is required to determine the feasibility of such applications, including the assessment of both the physical and mechanical properties of the resulting materials and their environmental safety. *Key words:* stone-processing slurry; Holovyne deposit; WDXRF; oxide composition; secondary raw material; agglomerated stone; geopolymer; leaching.

© Наумов Я.О., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Переробка облицювального каменю зазвичай супроводжується утворенням уламкових відходів та тонкодисперсних твердих частинок, які накопичуються у водоочисних системах підприємства, які осідають за допомогою флокулянтів. Повторне залучення даних відходів до виробництва матеріалів може вагомо скоротити потребу у первинній сировині, але потребує оцінювання складу сировини, її технологічної придатності та екологічність процесів.

Актуальність дослідження. Геологічні особливості Головинського родовища лабрадоритів Житомирській області складають основу цього дослідження. І найбільш практично вагомим напрямом для досліджуваної пульпи є виготовлення агломерованого штучного каменю та розробка лужно-активовані геополімерні системи. Для першого напряму визначальними є геометричні, декоративні та експлуатаційні характеристики виробу відповідно до призначення, а для другого напряму – це реакційна здатність вихідної сировини, режими активації, міцність і стійкість затверділої структури. При цьому обидва напрями повинні проходити самостійну нормативну та екологічну оцінку. У регіональному контексті, актуальність відповідає завданням управлінню відходами, представленими у Регіональному плані управління відходами в Житомирській області до 2034 року, затвердженому розпорядженням № 567 від 30.03.2026 [1]. При цьому треба відділяти лабораторний хімічний склад проб, виробничі обсяги та статистичні показники.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження продовжує напрям використання каменеобробних відходів у будівельних сумішей і геополімерних виробах, які представленні у попередніх працях авторів [2, 3]**.** На відміну від випробувань готових матеріалів, у цій роботі увагу зосереджено хімічній неоднорідності вихідної сировини яка впливає на вибір рецептури та якісний контроль.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Спираючись на статтю Coppola та ін., показує, що відходи природного каменю можуть працювати як наповнювачі або складники лужно-активованих систем, але їх роль залежить від мінеральних фаз та умов активації [4]. Дослідження Simao та інших співавторів показує практичний інтерес до геополімерів на основі відходів різання каменю [5]. Але результати для інших матеріалів не можуть автоматично переноситися на каменеобробну пульпу Головинського родовища. І для підтвердження екологічної відповідності необхідні окрім дослідження вилуговування за відповідними методиками [6].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Недостатньо описано однорідність складу дослідних партій каменеобробної пульпи Головинського родовища, і які саме групи компонентів змінюються найбільше. Також необхідно відокремити валовий оксидний потенціал від реальної реакційної здатності матеріалу.

Новизна. Наукова новизна полягає у кількісному описі міжпробної неоднорідності 8-ми зразків пульпи Головинського родовища на основі їх валового WDXRF-профілю та зіставленні похідних хімічних показників, які придатні до первинного групування сировини. Балансово-матеріальні формули використовуються як основа для оцінки потенційних потоків компонентів при наявності достовірних даних виробництва і не пропонуються як новий математичний метод.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методика поєднує в собі інструментальне вимірювання валового оксидного складу, описову статистику і матеріальний баланс. Ця послідовність дає виокремити виміряні показники від похідних розрахунків і від властивостей, що підлягають майбутній перевірці.

Викладення основного матеріалу. Об'єктом експериментального аналізу є вісім проб (1L – 7L, включно з 6_1L), які досліджувалися Інститутом геоміхії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України. Валовий оксидний склад визначено методом хвиледисперсійного рентгенофлуоресцентного аналізу WDXRF на Thermo Scientific Optin`X з використанням відібраних зразків дрібнодиспесної пульпи Головинського родовища лабрадориту. Матеріал висушували та подрібнювали на Retsch MM 400 до 30-40 мкм, змішували із Licowax C у масовому співвідношенні 4:1 та пресували під навантаженням 20 т. Втрати під час прожарювання (ВПП) визначали після нагрівання до 1000° протягом 2-х годин. Сам розрахунок ВПП/LOI (Lost of ignition) проводився за наступною формулою:

$$LOI = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100\% \quad (1)$$

де: m_1 – маса тигля з пробою до прожарювання;
m_2 – маса тигля з пробою після прожарювання 1000˚С.

Розрахунок середніх значень стандартного відхилення та коефіцієнта варіації дозволить оцінити однорідність хімічного складу досліджувальних зразків і визначити компоненти, що потребують підвищеного контролю при використанні пульпи в якості вторинної мінеральної сировини. Отримані результати – це основа для оцінки стабільності сировини, формування штучного каменю та лужно-активовавних матеріалів [3].

Для кожного визначеного показника розраховано мінімум, максимум, середнє арифметичне, вибіркове статистичне відхилення (S_i) та коефіцієнт варіації (CV_i).

Середнє арифметичне значення:

$$\bar{C}_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} C_{ij} \quad (2)$$

Вибіркове стандартне відхилення:

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}\left(C_{ij} - \bar{C}_i\right)^2} \quad (3)$$

Коефіцієнт варіації:

$$CV_i = \frac{S_i}{\bar{C}_i} * 100\% \quad (4)$$

Таблиця 1

Оксидний склад досліджених проб за результатами WDXRF, мас. %

Компонент	1 L	2 L	3 L	4 L	5 L	6 L	6_1 L	7 L
SiO_2	54,04	54,21	56,58	54,64	55,65	52,71	53,66	72,02
TiO_2	1,16	1,65	1,53	1,64	1,63	1,36	1,00	0,34
Al_2O_3	13,32	12,60	14,77	13,18	14,13	19,32	19,09	12,55
Fe_2O_3	13,65	13,57	10,72	12,29	11,47	7,94	7,51	4,41
MgO	4,31	4,83	3,09	5,27	3,26	2,56	2,44	0,10
MnO	0,16	0,18	0,15	0,18	0,16	0,07	0,06	0,03
CaO	6,59	5,06	4,67	5,11	4,79	10,48	10,44	0,98
K_2O	2,33	3,39	3,09	3,46	3,03	0,77	0,80	5,27
Na_2O	3,04	2,45	3,75	2,57	3,49	4,00	4,22	2,70
P_2O_5	0,34	0,77	0,79	0,72	0,81	0,17	0,17	0,03
LOI	1,12	1,10	1,18	0,96	1,59	0,62	0,00	1,72
Summ	100,06	99,81	100,32	100,02	100,01	100,00	99,39	100,15

Summ – сума наведених оксидних компонентів і LOI.

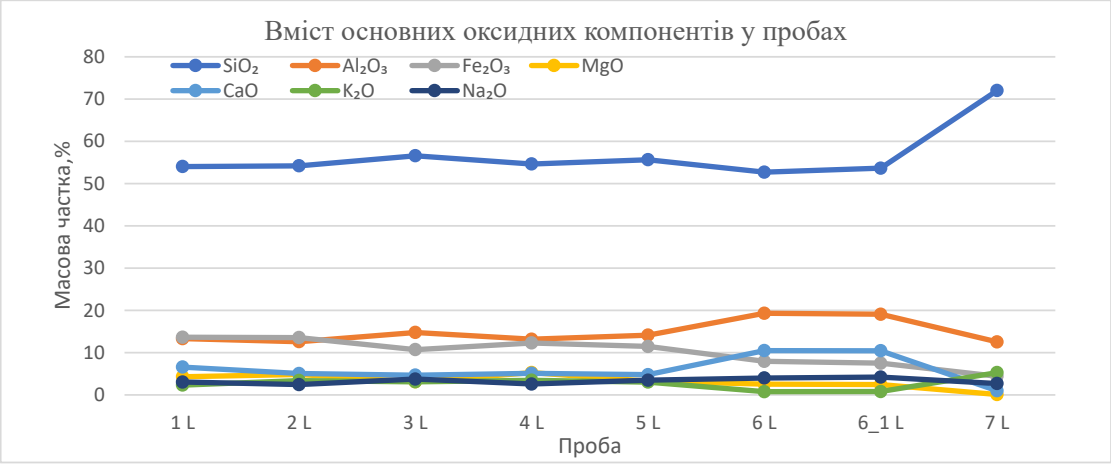

Рис. 1 Вміст основних оксидних компонентів у пробах

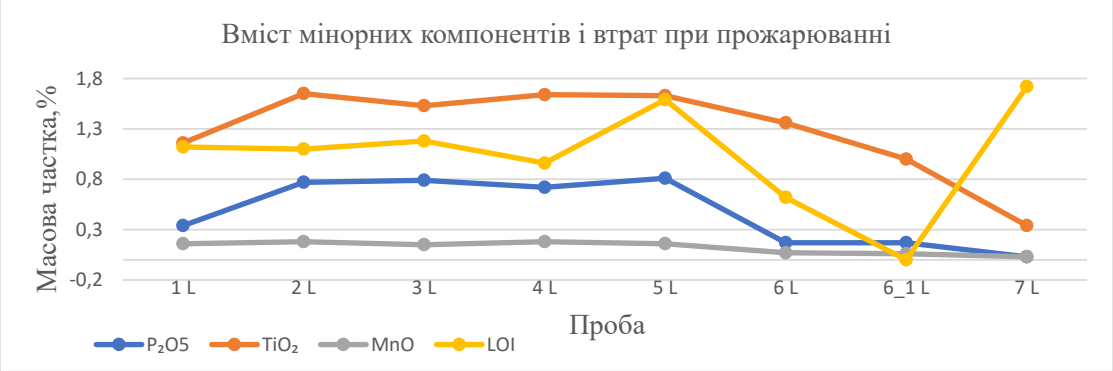

Рис. 2. Вміст TiO_2, MnO, P_2O_5 та LOI у досліджених пробах

Середнє значення Summ становить 99,97% діапазон – 99,39-100,32 %, а CV- близько 0,28 %. За показником відносної мінливості найбільшу нестабільність у вибірці демонструють такі оксиди: P_2O_5 (69,4 %), K_2O (53,5 %), CaO (52,7 %), втрати при прожарюванні LOI (52,3 %), MgO (50,7 %) та MnO (48,7 %). Помірні коливання спостерігаються для TiO_2 (35,1 %) і Fe_2O_3 (32,2 %). Натомість SiO_2 (11,1 %), Al_2O_3 (18,7 %) та Na_2O (20,8 %) залишаються відносно стабільними. Така картина свідчить, що аналіз лише SiO_2, Al_2O_3 і Fe_2O_3 не дає повного уявлення про неоднорідність матеріалу.

ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Для аналізу оксидного складу було виділено чотири узагальнені показники. Сума SiO_2+ Al_2O_3 відображає загальний алюмосилікатний потенціал. Поєднання Na_2O+K_2O характеризує вміст лужних оксидів. Параметр CaO+ MgO показує частку кальцієвих та магнієвих компонентів. Також, розглядається молярне співвідношення Si/Al, яке дає уявлення про баланс кремнію та алюмінію, які необхідні в якості сировини для агломерованого каменню або геополімеру [8]. Такі показники не замінюють рентгенофазовий аналіз чи оцінку реакційної здатності, однак дозволяють коректно порівнювати між собою різні проби:

Валове молярне співвідношення:

$$R_{\frac{Si}{Al}} = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \approx 3,44\, моль\, Si\, на 1\, моль\, Al \qquad (5)$$

Проби 6 L і 6_1 L мають підвищені значення CaO+MgO (13,04 та 12,88 %) значить, тоді, нижче валове молярне співвідношення Si/Al (2,31–2,39). При цьому проба 7 L вирізняється найвищим сумарним вмістом SiO_2+Al_2O_3 (84,57 %) та найбільшим співвідношенням Si/Al (4,87), але але має мінімальний CaO+MgO (1,08 %). Такі відмінності підтверджують різні хімічні профілі досліджуваних проб і обгрунтовують необхідність їх окремої технологічної перевірки при оцінюванні придатності для виробництва агломерованого каменю та лужно-активованих матеріалів.

Математична модель ресурсного потенціалу. За наявності фактичного обсягу переробленої сировини Q та питомого виходу сухої пульпи k_n її масу можна визначити матеріальним балансом:

$$M_n = Q \cdot k_n \qquad (6)$$

Теоретична маса оксидного компонента і у потоці сухої пульпи:

$$M_i = Q \cdot k_n \cdot \frac{C_i}{100} \qquad (7)$$

де: C_i – це концентрація відповідного оксиду

Для неоднорідної суміші різного складу:

$$M_i = Q \cdot k_n \sum_{j=1}^{n} w_j \frac{C_{ij}}{100}, де \sum_{j=1}^{n} w_j = 1 \qquad (8)$$

Ця модель є балансовою, і вона дозволяє прогнозувати не лише загальну кількість відходів, а й теоретичну кількість кожного оксидного компонента, але при цьому вона не дозволяє оцінити реакційну здатність матеріалу.

Для агломерованого каменю WDXRF-профіль є характеристикою мінерального наповнювача, але аби його застосовувати, треба щоб придатність підтверджувалася водопоглинанням, густиною, міцністю на згин, стиранністю, морозостійкістю, хіміч-

Таблиця 2

Описова статистика хімічного складу восьми проб

Показник	Min	Max	$\bar{C}_i$	S_i	CV_i, %
SiO_2	52,71	72,02	56,69	6,31	11,13
TiO_2	0,34	1,65	1,29	0,45	35,12
Al_2O_3	12,55	19,32	14,87	2,78	18,67
Fe_2O_3	4,41	13,65	10,20	3,28	32,19
MgO	0,10	5,27	3,23	1,64	50,67
MnO	0,03	0,18	0,12	0,06	48,66
CaO	0,98	10,48	6,01	3,17	52,66
K_2O	0,77	5,27	2,77	1,48	53,52
Na_2O	2,45	4,22	3,28	0,68	20,80
P_2O_5	0,03	0,81	0,47	0,33	69,41
LOI	0,00	1,72	1,04	0,54	52,33
Summ	99,39	100,32	99,97	0,28	0,28

Таблиця 3

Похідні показники хімічного складу

Проба	$SiO_2+Al_2O_3$, %	Na_2O+K_2O, %	CaO+MgO, %	Si/Al, мол.
1 L	67,36	5,37	10,9	3,44
2 L	66,81	5,84	9,89	3,65
3 L	71,35	6,84	7,76	3,25
4 L	67,82	6,03	10,38	3,52
5 L	69,78	6,52	8,05	3,34
6 L	72,03	4,77	13,04	2,32
6_1 L	72,75	5,02	12,88	2,39
7 L	84,57	7,97	1,08	4,87

ною стійкістю і декоративними властивостями, які вказані в ДСТУ EN 14617 і ДСТУ EN 14618 [7, 8]. Інші оксиди, такі як: Fe_2O_3, MnO, TiO_2 доцільно враховувати як фактори кольорових характеристик виробів [9].

Для лужно-активованих матеріалів високий валовий вміст SiO_2+Al_2O_3 свідчить алюмосилікатний ресурс, але WXDRF не визначає реакційну частку. Тому необхідно провести гранулометрію, визначити питому поверхню і провести серію експериментальних замішувань. Але після отримання експериментальних даних, пропонується модель для майбутньої експериментальної верифікації міцності:

$$R_c = f(P, C, A).$$

де P – це частка пульпи, C – цементна добавка, A – параметр лужної активації. Як орієнтир для гранульованих відходів та шламів можна розглядати EN-12457-2 [6].

Екологічну верифікації доцільно проводити для вихідної пульпи та готового матеріалу. Питоме лабораторне вилуговування компонента визначають як:

$$E_i = \frac{(c_i - c_i)V}{m},$$

а ефект фіксації в готовому матеріалі можна характеризувати індексом іммобілізації:

$$I_i = \left(1 - \frac{E_{i\ готового\ виробу}}{E_{i\ пульпи}}\right) \times 100\%.$$

Додатково частку вторинної сировини у продукті можна характеризувати:

$$S_r = \frac{M_{пульпи}}{M_{готового\ виробу}} \times 100\%.$$

Ці показники дають змогу поєднати ресурсний ефекти із контролем міграції компонентів.

Головні висновки. WXDRF – аналіз восьми проб показав переважання SIO_2 (52,71–72,02 %) та відмінності за Fe_2O_3, CaO, MgO і K_2O. Сума оксидів становить 99,39 – 100,32%, що також підтверджує аналітичне замикання, хоча дані проби 6_1L потребують уточнення. Найбільшу мінливість мають P_2O_5, K_2O, CaO, LOI, MgO і MnO, і тому їх слід контролювати. Валовий слід Si/Al (2,31–4,87) показує кальцієво-магнієве збагачення проб 6L і 6_1L та алюмо-силікатне збагачення 7L. Запропоновані балансові рівняння дозволяють оцінювати теоретичні потоки сухої пульпи й оксидних компонентів лише за наявності підтверджених виробничих даних. Придатність пульпи для агломерованого каменю та геополімерів потребує окремих експериментальних випробувань.

Перспективи використання результатів дослідження. В подальшому робота передбачає розширення репрезентативних проб, дослідження гранулометрії, виготовлення контрольованих серій лужно-активованих виробів та випробування їх фізико-механічні характеристики і вилуговування. Також перспективним напрямом є порівняльна оцінка ресурсозбереження та екологічний вплив з урахуванням витрат лужних активаторів, використання енергії та транспортування.

Література

1. Регіональний план управління відходами в Житомирській області до 2034 року : затв. розпорядженням начальника Житомирської обласної військової адміністрації від 30 березня 2026 р. № 567. Житомир, 2026. URL: https://oda.zht.gov.ua/oda/2026-2/berezen/rozporyadzhennya-567-vid-30-03-2026-pro-zatverdzhennya-regionalnogo-planu-upravlinnya-vidhodamy-v-zhytomyrskij-oblasti-do-2034-roku/
2. Shamrai V., Leonets I., Melnyk-Shamrai V., Patseva I., Naumov Y. Reuse of stone working enterprise slurry in geopolymer and concrete products. Mining of Mineral Deposits. 2024. Vol. 18(4). P. 10-17. https://doi.org/10.33271/mining18.04.010
3. Наумов Я.О., Башинський С.І., Припотень Ю.К., Блецко М.І. Застосування дрібнодисперсних відходів каменеобробних підприємств в якості наповнювачів будівельних розчинів. Науковий вісник ДонНТУ. 2023. №2(11). С. 119-127. https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-2-11-119-127
4. Coppola B., Tulliani J.-M., Antonaci P., Palmero P. Role of natural stone wastes and minerals in the alkali activation process: a review. Materials. 2020. Vol. 13, № 10. Article 2284. DOI: https://doi.org/10.3390/ma13102284.
5. Simão L., Hotza D., Ribeiro M. J., Novais R. M., Montedo O. R. K., Raupp-Pereira F. Development of new geopolymers based on stone cutting waste. Construction and Building Materials. 2020. Vol. 257. Article 119525. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119525
6. EN 12457-2:2002. Characterisation of waste – Leaching – Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges – Part 2: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 4 mm (without or with size reducti on). Brussels : European Committee for Standardization, 2002. https://www.nen.nl/nen-en-12457-2-2002-en-82489
7. ДСТУ EN 14617. Агломерований камінь. Методи випробувань : серія національних стандартів України. Київ : ДП «УкрНДНЦ».
8. ДСТУ EN 14618:2022 (EN 14618:2009, IDT). Агломерований камінь. Термінологія та класифікація. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.
9. Герасимчук Л. О., Кириленко Н. П., Пацева І. Г., Валерко Р. А. Цифрові інструменти управління екологічними ризиками на кар'єрах блочного каменю: рекомендації та практичні рішення. Природнича освіта та наука. 2025. № 5. С. 63-69. DOI: https://doi.org/10.32782/NSER/2025-5.09

Дата першого надходження статті до видання: 13.10.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.11.2026