

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-17>

УДК 666.9.022

ДОРОГАНЬ НАТАЛІЯ

Національний технічний університет України

«КПІ імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-4304-1297>

E-mail: nataliyadorogan@ukr.net

ЧЕРНЯК ЛЕВ

Національний технічний університет України

«КПІ імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0001-8479-0545>

E-mail: lpchernyak@ukr.net

ШНИРУК ОЛЕГ

Національний технічний університет України

«КПІ імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0001-7840-6201>

E-mail: shnyruk@gmail.com

ДО ПИТАННЯ ОТРИМАННЯ ЦЕМЕНТУ З СИРОВИНИ ЗАХІДНОЇ УКРАЇНИ

Виробництво цементу відзначається споживанням великих об'ємів сировинних матеріалів, критерії вибору яких відзначаються їх складом, запасами та можливостями стабільного постачання на підприємства. При цьому оптимізація питань логістики посилює актуальність використання сировини із джерел, наближених до підприємства-виробника з одного регіону.

В поданій роботі досліджено можливість виготовлення цементу низькотемпературного випалу (≤ 1200 °C) з комплексним використанням природної та техногенної сировини Західної України на основі системи вапняк-перліт-зола виносу.

В роботі комплексно використовувались методи фізико-хімічного аналізу силікатів та стандартизовані технологічні тестування властивостей в'язучого матеріалу. Розрахунки складу сировинних сумішей проводили із застосуванням комп'ютерної програми «РоманЦем».

Відзначено особливості хіміко-мінералогічного складу вапняку як карбонатвмісного та перліту і золи виносу як алюмо- та кремнеземвмісних компонентів.

Проведено розрахунки кількісного співвідношення дослідженої сировини у сумішах для виготовлення цементу з аналізом відповідності рекомендованим модульним характеристикам.

За результатами вказаних розрахунків та аналізу визначено склади вихідних сировинних сумішей на основі систем вапняк-перліт-зола виносу при варіюванні кількісного співвідношення перліту до золи виносу від 1,0:1,2 до 2,0:1,0.

Показано особливості фазового складу цементу з сировинних сумішей на основі досліджених силікатних систем при випалі з максимальною температурою 1100 °C та можливість регулювання властивостей мінерального в'язучого матеріалу при варіюванні розроблених складів вихідних сумішей.

Зроблено висновок про можливість підвищення техніко-економічної ефективності регіонального виробництва цементу з комплексним використанням сировини Західної України при одночасному вирішенні питань логістики, ресурсозбереження та регулювання властивостей мінерального в'язучого матеріалу.

Ключові слова: цемент, перліт, зола виносу, суміш сировинна, фази кристалічні, властивості.

DOROGAN NATALIYA, CHERNYAK LEV, SHNYRUK OLEG

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ON THE QUESTION OF OBTAINING CEMENT FROM WESTERN UKRAINIAN RAW MATERIALS

Cement production is characterized by the consumption of large volumes of raw materials, the selection criteria for which are determined by their composition, reserves, and the ability to ensure stable supply to the plants. In this context, optimizing logistics emphasizes the relevance of using raw materials from sources located close to the manufacturing plant within the same region.

This paper investigates the possibility of producing low-temperature-fired cement (≤ 1200 °C) with the integrated use of natural and technogenic raw materials from Western Ukraine, based on the limestone–perlite–fly ash system. The study employed a comprehensive approach, combining physico-chemical analysis methods for silicates and standardized technological tests of the binder material's properties. The compositions of the raw material mixtures were calculated using the "RomanCem" computer program.

The chemical–mineralogical features of limestone (as a carbonate-bearing component) and perlite and fly ash (as alumina- and silica-bearing components) were analyzed. Calculations of the quantitative ratios of the studied raw materials in the mixtures for cement production were performed, with an assessment of their compliance with the recommended modular characteristics. Based on these calculations and analyses, the compositions of the initial raw material mixtures in the limestone–perlite–fly ash system were determined, varying the quantitative ratio of perlite to fly ash from 1.0:1.2 to 2.0:1.0.

The phase composition characteristics of cement produced from the investigated silicate systems at a firing temperature of up to 1100 °C were demonstrated, as well as the possibility of adjusting the properties of the mineral binder material by varying the developed initial mixture compositions. It was concluded that the technical and economic efficiency of regional cement production can be improved through the integrated use of raw materials from Western Ukraine, while simultaneously addressing logistics, resource conservation, and adjustment of the mineral binder's properties.

Keywords: cement, perlite, fly ash, raw material mixture, crystalline phases, properties.

Стаття надійшла до редакції / Received 28.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.08.2025

Вступ

Виробництво мінеральних в'язучих матеріалів, в тому числі цементу, відзначається великою ресурсоемністю – підвищеними питомими витратами вихідної сировини, теплової та електричної енергії [1,2]. Техніко-економічна ефективність роботи діючих підприємств-виробників багато в чому залежить від їх наближення до родовищ сировини, проте вони є вичерпними та не відновлювальними. Це визначає актуальність вирішення проблеми перспективного розвитку регіональної сировинної бази підприємств галузі як фактору їх стабільної та ефективної роботи.

Аналіз останніх досліджень

Сучасне індустріальне виробництво цементу потребує великої кількості сировинних і енергетичних ресурсів. При цьому поряд з технологічними вимогами щодо складу та властивостей сировинних компонентів важливе значення для ефективної роботи підприємств-виробників мають питання логістики – транспортування та стабільного постачання необхідних матеріалів [3,4].

Вичерпність та невідновлюваність родовищ природної карбонатної та глинистої цементної сировини [3,4] обумовлює необхідність залучення у виробництво нових вихідних матеріалів різного генезису, відповідних за складом, запасами та умовами постачання [5,6].

В цьому зв'язку відомі дослідження та розробки використанню порід вулканічного походження [7,8] – перш за все базальту та залізовмісних відходів промисловості [9,10] – перш за все піритних недопалків. Щодо регіонального виробництва цементу на підприємствах Західної України привертає увагу використання закарпатського перліту та відходів теплоенергетики.

Перліт – це загальний термін для позначення кремнієвої породи, яка зустрічається у природі. Родовища перлітів зазвичай приурочені до областей прояву палеоген-четвертинного вулканізму. Світові запаси родовищ перліту становлять близько 700 мільйонів тон. В Україні вони локалізовані у межах Берегівського району Закарпатської області, де пов'язані з вулканічними утвореннями Вигорлат-Гутинського пасма [11-13].

Умови утворення визначили особливості складу та структури перлітів як матеріалу, що характеризується як вулканічне скло аморфної природи та відзначається відносно високим вмістом води. Зазвичай перліти містять 20 – 25 мас. % кристалічної і 75 – 80 мас. % склоподібної фази. Кристалічна фаза може бути представлена глинистими мінералами групи монтморилоніту, каолініту, цеоліту, галуазиту і гідролуд. У вигляді вкраплень присутні кварц, калієвий і натрієвий польові шпати, плагіоклази, біотит і гематит. У складі перліту можуть бути присутні метастабільні кристоболіт і тридиміт, а також аморфний кремнезем. Хімічний склад перліту коливається в межах, мас. %: SiO_2 – 68 – 75; Al_2O_3 – 11 – 17; Fe_2O_3 – 0,4 – 3; CaO – 0,7 – 3; R_2O – 5 – 9. Втрати маси при прожарюванні перлітів складають 2 – 6 мас. % і обумовлені видаленням хімічно зв'язаної води в температурних діапазонах 50 – 400 і 800 – 1000 °C.

Структурні та об'ємні зміни при нагрівні та видаленні хімічно зв'язаної води стали основою технології отримання спученого перліту, що використовується як наповнювач для виготовлення легких бетонів, пластмас, засобів фільтрації та очищення [14-16]. Дослідженнями О.О. Пашенка вказано на перспективність виробництва кремнеземистих цементів із використанням перліту як кислого вулканічного скла.

Золу виносу отримують на теплових електростанціях, які використовують кам'яне вугілля. Поточний річний обсяг виробництва золи на ТЕС у світі становить 112 мільйонів тон.

Залежно від виду вугілля та технології його спалювання, золи відрізняються за хімічним складом. При переважній більшості CaO вони класифікуються як основні, SiO_2 – як кислі. При цьому мінералогічний склад золи виносу поряд із кристалічними фазами відзначається розвитком скло фази. Звідси ці відходи теплоенергетики розглядаються як джерело додаткових ресурсів для виробництва силікатних будівельних матеріалів [17,18]. Згідно ДСТУ Б В.2.7-205:2009 [19] зола виносу використовується як компонент для виготовлення важких, легких та ніздрюватих бетонів і будівельних розчинів, а також як тонкомелена добавка для жаростійких бетонів. Як активна мінеральна добавка при помелі клінкеру застосовуються у виробництві цементів, головним чином композиційних.

Вказані особливості складу, значні запаси перліту та об'єми накопичення золи виносу вказують на доцільність і перспективність використання цих різновидів природної та техногенної сировини у масовому виробництві цементу.

Метою даної роботи стало дослідження силікатної системи вапняк-перліт-зола виносу та визначення складу сировинних сумішей для регіонального виробництва цементу в Західній Україні.

Експериментальна частина

Методи та об'єкти дослідження

Об'єктом дослідження стала силікатна система на основі композицій природної та техногенної сировини західної України, що відрізняється за генезисом і складом.

За генезисом серед природних матеріалів вапняк відноситься до гірських порід осадового походження, а перліт є породою вулканічного походження. Зола виносу є відходом теплоенергетики та відноситься до техногенної сировини.

За хімічним складом, вапняк відзначається найбільшим вмістом CaO (табл. 1), а перліт та зола виносу значно більшим вмістом оксидів кремнію та алюмінію при значній різниці в їх кількісному

співвідношенні. Так, перліт характеризується співвідношенням $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3 = 5,6$ проти 2,6 для золи-виносу, проте ці ознаки ступеню тугоплавкості корегуються більшим вмістом лужних оксидів у випадку перліту та оксидів заліза у випадку золи виносу.

Таблиця 1

Хімічний склад вихідних матеріалів

Матеріал	Вміст оксидів, мас. %								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	п.п.п.
Вапняк	3,13	0,06	1,05	-	52,82	0,52	-	-	42,32
Перліт	72,08	12,92	1,50	0,90	0,88	0,63	-	3,76	4,33
Зола виносу	46,12	18,00	22,17	1,78	4,03	1,46	0,21	-	2,10

За мінералогічним складом вапняк характеризується переважним вмістом кальциту CaCO_3 , зола виносу (рис. 1) відзначається наявністю склофази та кристалічних фаз, головним чином - кварцу, муліту. Перліт (рис. 2) характеризується переважним розвитком склофази зі значними домішками кристалічних фаз кварцу та польового шпату.

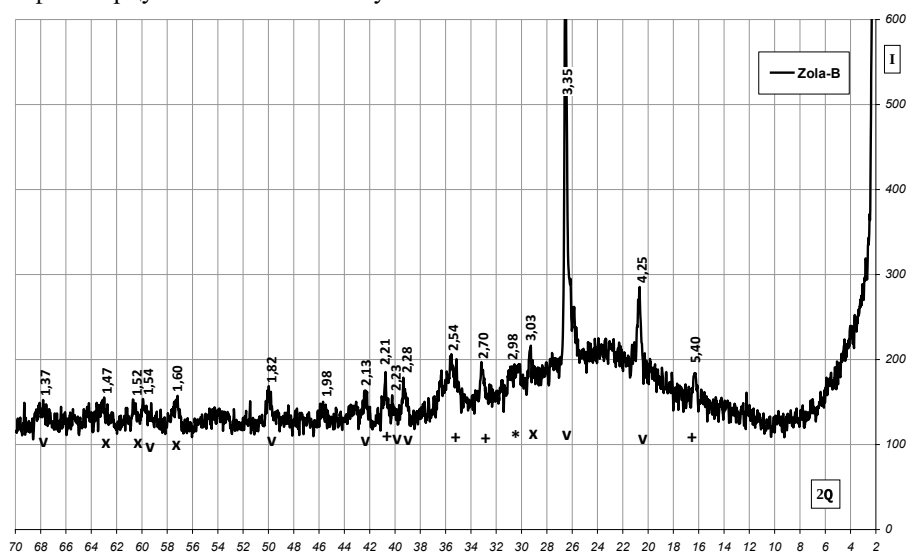


Рис. 1. Дифрактограма золи-виносу: v кварц, + муліт, x кальцит

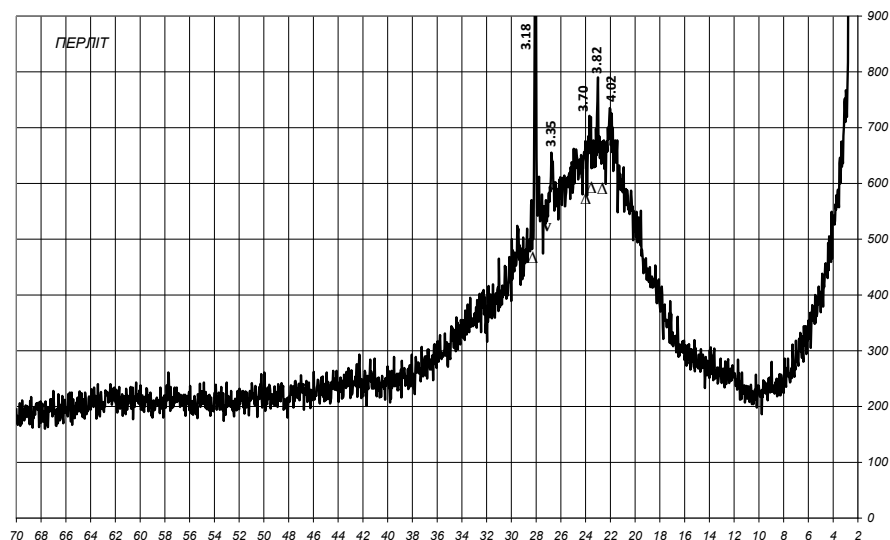


Рис. 2. Дифрактограма проби перліту: v-кварц, Δ-польовий шпат

Визначення та аналіз складу сировинних сумішей

Результати комп'ютерних розрахунків з використанням програми «РоманЦем» показали, що можливий вміст відходів теплоенергетики в 3-компонентній суміші на основі системи вапняк – перліт – зола виносу становить від 2 до 23 мас.% при гідравлічному модулі $\text{HM}=1.10$ та від 2 до 13 мас. % при гідравлічному модулі $\text{HM}=1.70$ (рис. 3).

При цьому в інтервалі концентрацій золи виносу $\text{C}=7-18$ мас. % при $\text{HM}=1,10$ та $\text{C}=7-13$ мас. % при $\text{HM}=1,70$ в'язучий матеріал характеризується числами кремнеземного та глиноземного модулів, що відповідають рекомендованим показникам для цементу.

Визначено, що варіювання кількісним співвідношенням компонентів сировинної суміші на основі системи вапняк-перліт-зола виносу супроводжується суттєвими змінами хімічного складу (табл. 2, 3).

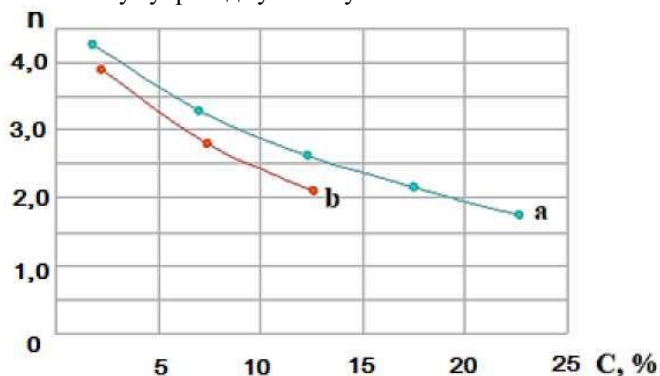


Рис. 3. Залежність кремнеземного модуля n від концентрації золи виносу C в суміші на основі системи вапняк-перліт при $NM=1,1$ (а) і $NM=1,7$ (б)

Таблиця 2

Хімічний склад сировинних сумішей при $NM=1,1$

Вміст золи виносу, мас. %	Вміст оксидів, мас. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	в.п.п.
1,8	26,78	4,65	1,64	36,40	0,58	0,07	29,88
22,7	21,22	5,83	6,25	36,62	0,77	0,12	29,19

Таблиця 3

Хімічний склад сировинних сумішей при $NM=1,7$

Вміст перліту, мас. %	Вміст оксидів, мас. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	в.п.п.
2,2	19,37	3,31	1,67	41,38	0,57	0,08	33,62
12,6	16,56	3,90	3,96	41,51	0,67	0,11	33,29

При заданому гідралічному модулі $NM=1,1$ та $NM=1,7$ із можливим зростанням вмісту золи виносу має місце зменшення кількості SiO₂ та співвідношення SiO₂: Al₂O₃, зменшення вмісту оксидів заліза.

Для подальшого дослідження особливостей мінерального в'язучого на основі системи вапняк – перліт – зола виносу було обрано проби 40м і 42м, склад яких після випалу має забезпечити рекомендовані значення кремнеземного модулю (n) 2,1 і 2,8 та глиноземного (p) 1,1 і 1,3 (табл. 4).

Таблиця 4

Склад сировинних сумішей

Код суміші	Вміст компонентів, мас. %		
	вапняк	перліт	зола виносу
40м	67,5	15,0	17,5
42м	77,6	15,0	7,4

Кількісному співвідношенню компонентів відповідають відмінності хіміко-мінералогічного складу 3-компонентних сумішей.

Аналіз хімічного складу досліджуваних сумішей свідчать, що при більшому вмісті золи виносу проба 40м відрізняється від 42м меншим вмістом оксиду кальцію, більшою кількістю оксидів кремнію, алюмінію та заліза (табл. 5). При цьому відмінності кількісних співвідношень оксидів вказують на вірогідні особливості спікання та фазоутворень при випалі.

Таблиця 5.

Хімічний склад сумішей

Код суміші	Вміст оксидів, мас. %						
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	в.п.п.
40м	36,57	22,61	5,53	5,10	0,72	0,11	29,36
42м	41,44	17,96	3,61	2,82	0,62	0,10	33,45

Так, проба 40м відрізняється від 42м:

- меншим кількісним співвідношенням SiO₂ : Al₂O₃ = 4,1 проти 5,0, що є ознакою більшої тугоплавкості;
- меншими кількісними співвідношеннями CaO : SiO₂ = 1,6 проти 2,5 та CaO : Al₂O₃ = 6,1

проти 11,5, що вказує на підвищену вірогідність утворення при випалі сполук силікатів і алюмосилікатів кальцію.

Мінералогічний склад суміші 40м відрізняється від 42м меншим вмістом кальциту CaCO_3 , що становить 65,3 проти 74,0 мас.%. При цьому відповідно меншими є можливі викиди CO_2 при випалі клінкеру – 28,7 проти 32,6 %.

Фазовий склад і властивості в'язучого матеріалу

За отриманими результатами рентгенофлуоресцентного аналізу хімічний склад досліджуваних проб після випалу з максимальною температурою 1100 °C відповідає вказаним особливостям для вихідних сумішей (табл. 6).

Таблиця 6.

Хімічний склад матеріалу після випалу

Код проби	Вміст оксидів, %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅
40м	32,97	9,77	6,67	0,42	46,72	0,79	0,52	1,43	0,26
42м	24,93	6,38	4,75	0,27	60,77	0,78	0,37	0,99	0,23

Рентгенофазовий аналіз проб показав, що при приблизно однаковому якісному складі мають певні відмінності в кількісному співвідношенні окремих фаз (рис. 4, 5).

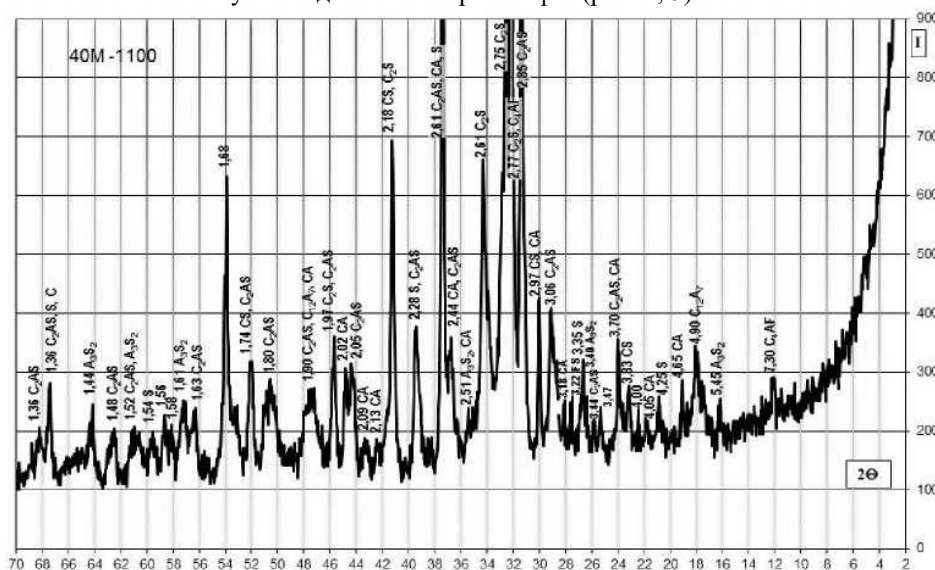


Рис. 4. Дифрактограма проби 40М (1100 °C)

Виявлено, що при однаковому вмісті перліту із збільшенням кількості золи виносу та проба 40м відрізняється від 42м:

- щодо кристалічних фаз силікатів кальцію - більшим утворенням воластоніту CS (2,97 Å) та C2S (2,61 Å);
- щодо кристалічних фаз алюмосилікатів кальцію - більшим утворенням геленіту C2AS (2,86 Å).

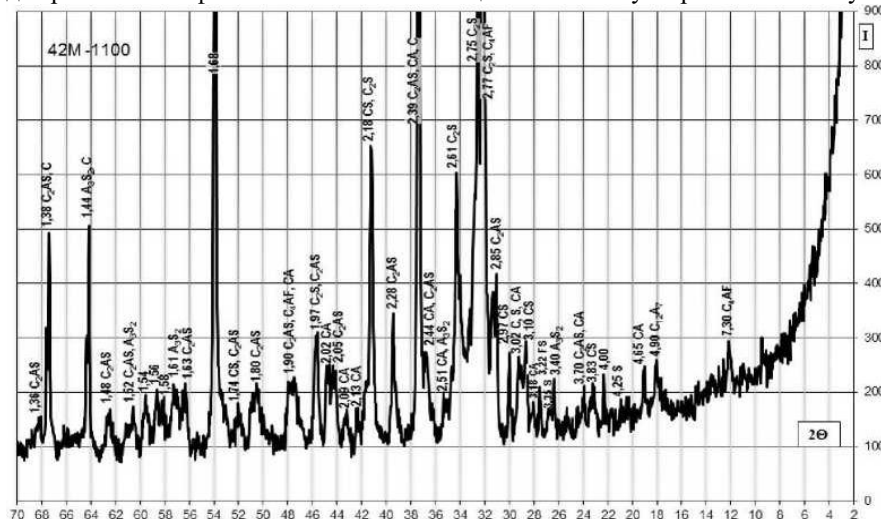


Рис. 5. Дифрактограма проби 42М (1100 °C)

Згідно класифікації ДСТУ Б В.27-91-99 після випалу на 1100 °С за швидкістю тузавлення досліджувані проби в'язучого на основі системи вапняк – перліт – зола виносу відносяться до групи швидко тузавлюючих (термін початку від 15 до 45 хв.), характерними представниками якої вважаються ангідритовий та глиноземистий цементи (табл. 7).

Таблиця 7

Властивості в'язучого матеріалу

Показники		Код проби	
		40м	42м
Тонкість помелу, залишок на ситі 008, мас. %		7	8
Терміни тузавлення, хв.	початок	20	40
	кінець	65	70
Міцність на стиск через 28 діб, МПа		24,7	22,4

Висновки

Оцінка можливості та ступеню ефективності використання окремих різновидів сировини як компонентів вихідної суміші для виготовлення цементу має враховувати особливості їх складу, запасів та стабільного постачання підприємствам-виробникам з позицій логістики. В цьому зв'язку досліджено композицію природної та техногенної сировини Західної України вапняк-перліт-зола виносу ТЕС як базис регіонального виробництва мінерального в'язучого матеріалу.

Відзначено особливості хіміко-мінералогічного складу досліджуваної сировини як карбонатних і алюмо- та кремнеземвмісних компонентів, необхідних для спікання та фазових перетворень при випалі. При цьому щодо перліту і золи виносу вказано на значення підвищеного вмісту лужних оксидів, оксидів заліза та з аморфного кремнезему рисової лузги, оксидів заліза та розвиток склофази.

Встановлено можливість отримання різновиду цементу низькотемпературного випалу (≤ 1200 °С) із варіюванням в'язучих властивостей при зміні в складі вихідних сумішей кількісного співвідношення перліту до золи виносу від 1 : 1,2 до 2 : 1.

Література

1. Рунова, Р. Ф., Дворкін, Л. Й., Дворкін, О. Л., & Носовський, Ю. Л. (2012). В'язучі речовини. Основа.
2. Winter, N. B. (2012). Understanding cement. WHD Microanalysis Consultants Ltd.
3. Черняк, Л. П. (2003). Критерії вибору сировини для сучасного виробництва будівельної кераміки. Будівельні матеріали та вироби, (1), 2–4; (2), 6–8.
4. Taylor, G. D. (2019). Introduction to logistics engineering. Taylor & Francis Group.
5. Duda, W. H. (1988). Cement data book, Volume 3: Raw material for cement production. French & European Publications.
6. Ramesh, M., Karthic, K. S., Karthikeyan, T., & Kumaravel, A. (2014). Construction materials from industrial wastes – a review of current practices. International Journal of Environmental Research and Development, 4(4), 317–324. https://www.ripublication.com/ijerd_spl/ijerv4n4spl_08.pdf
7. Черняк, Л. П. (2016). Структурні зміни та властивості магматичних порід Західної України. Кераміка: наука и жизнь, (4) (33), 4–12.
8. Pellant, C., & Pellant, H. (2021). Rocks and minerals. Dorling Kindersley.
9. Allen, D. T., & Benmanesh, N. (1994). Wastes as raw materials. In B. R. Allenby & D. J. Richards (Eds.), The greening of industrial ecosystems (pp. 69–89). National Academy Press. <https://www.nap.edu/read/2129/chapter/7>
10. Bhatia, H. S. (2020). A comprehensive book on industrial waste and its management. The Readers Paradise.
11. Білецький, В. С. (Ред.). (2004). Мала гірнича енциклопедія (Т. 1). Донбас.
12. Сивий, М., Паранько, І., & Іванов, Є. (2013). Географія мінеральних ресурсів України: монографія. Простір М.
13. Алексєєва, Л. В., & Волков, Б. Г. (2020). Вдосконалення технології виробництва фракціонованої перлітової сировини родовища Фогош та реконструкція підприємства ПрАТ «Берегіаський кар'єр». Будівельні матеріали та вироби, (1–2), 56–59.
14. Singh, M., & Garg, M. (1991). Perlite-based building materials — a review of current applications. Construction and Building Materials, 5(2), 75–81.
15. Davraz, M., Koru, M., & Isildar, N. (2025). Design of perlite based thermal insulation plate and determination of its physical, mechanical and thermal properties. International Journal of Thermophysics, 46, 31. <https://doi.org/10.1007/s10765-025-03503-x>

16. Abed, A. T., & Éva, L. (2025). A comprehensive study of perlite in building materials: Balancing sustainability and performance. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14410-6>
17. Kou, S., Poon, C., & Chan, D. (2007). Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(9), 709–717.
18. Ondova, M., Stevulova, N., & Estokova, A. (2012). The study of the properties of fly ash based concrete composites with various chemical admixtures. *Procedia Engineering*, 42, 1863–1872.
19. Мінрегіонбуд України. (2010). ДСТУ Б В.2.7-205:2009. Золи-виносу теплових електростанцій для бетонів. Технічні умови. Київ.
20. Свідерський, В. А., Черняк, Л. П., Сангінова, О. В., Дорогань, Н. О., & Цибенко, М. Ю. (2017). Програмне забезпечення технології низькотемпературних в'язучих матеріалів. Будівельні матеріали та вироб, (1–2)(93), 22–24.
21. Держбуд України. (1999). ДСТУ Б В.2.7-91-99. В'язучі мінеральні. Класифікація. Київ.

References

1. Runova, R. F., Dvorkin, L. I., Dvorkin, O. L., & Nosovskyi, Yu. L. (2012). *V'iazhuchi rechovyny*. Kyiv: Osnova.
2. Winter, N. B. (2012). *Understanding cement*. WHD Microanalysis Consultants Ltd.
3. Cherniak, L. P. (2003). Kryterii vyboru syrovyny dlia suchasnoho vyrobnytstva budivelnoi keramiky. *Budivelni materialy ta vyroby*, (1), 2–4; (2), 6–8.
4. Taylor, G. D. (2019). *Introduction to logistics engineering*. Taylor & Francis Group.
5. Duda, W. H. (1988). *Cement data book, Volume 3: Raw material for cement production*. French & European Publications.
6. Ramesh, M., Karthic, K. S., Karthikeyan, T., & Kumaravel, A. (2014). Construction materials from industrial wastes – a review of current practices. *International Journal of Environmental Research and Development*, 4(4), 317–324. https://www.ripublication.com/ijerd_spl/ijerdv4n4spl_08.pdf
7. Cherniak, L. P. (2016). Strukturni zminy ta vlastyvoli mahmatychnykh porod Zakhidnoi Ukrainy. *Keramika: nauka i zhizn'*, (4) (33), 4–12.
8. Pellant, C., & Pellant, H. (2021). *Rocks and minerals*. Dorling Kindersley.
9. Allen, D. T., & Benmanesh, N. (1994). Wastes as raw materials. In B. R. Allenby & D. J. Richards (Eds.), *The greening of industrial ecosystems* (pp. 69–89). National Academy Press. <https://www.nap.edu/read/2129/chapter/7>
10. Bhatia, H. S. (2020). *A comprehensive book on industrial waste and its management*. The Readers Paradise.
11. Biletskyi, V. S. (Ed.). (2004). *Mala hirnychy entsyklopediia* (Vol. 1). Donetsk: Donbas.
12. Syvyi, M., Paran'ko, I., & Ivanov, Ye. (2013). *Heohrafiia mineralnykh resursiv Ukrainy: monohrafiia*. Lviv: Prostir M.
13. Alekseeva, L. V., & Volkov, B. H. (2020). Vdoskonalennia tekhnolohii vyrobnytstva fraktsionovanoi perlitovoi syrovyny rodovyshcha Fohosh ta rekonstruktsiia pidpriemstva PrAT «Bereiaskyi kariier». *Budivelni materialy ta vyroby*, (1–2), 56–59.
14. Singh, M., & Garg, M. (1991). Perlite-based building materials — a review of current applications. *Construction and Building Materials*, 5(2), 75–81.
15. Davraz, M., Koru, M., & Isildar, N. (2025). Design of perlite based thermal insulation plate and determination of its physical, mechanical and thermal properties. *International Journal of Thermophysics*, 46, 31. <https://doi.org/10.1007/s10765-025-03503-x>
16. Abed, A. T., & Éva, L. (2025). A comprehensive study of perlite in building materials: Balancing sustainability and performance. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14410-6>
17. Kou, S., Poon, C., & Chan, D. (2007). Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(9), 709–717.
18. Ondova, M., Stevulova, N., & Estokova, A. (2012). The study of the properties of fly ash based concrete composites with various chemical admixtures. *Procedia Engineering*, 42, 1863–1872.
19. Minrehionbud Ukrainy. (2010). DSTU B V.2.7-205:2009. Zoly-vynosu teplovykh elektrostantsii dlia betoniv. Tekhnichni umovy. Kyiv.
20. Sviderskyi, V. A., Cherniak, L. P., Sanhinova, O. V., Dorohan', N. O., & Tsybenko, M. Yu. (2017). Prohramne zabezpechennia tekhnolohii nyzkotemperaturnykh v'iazhuchykh materialiv. *Budivelni materialy ta vyroby*, (1–2)(93), 22–24.
21. Derzhbud Ukrainy. (1999). DSTU B V.2.7-91-99. V'iazhuchi mineralni. Klyasyfikatsiia. Kyiv.