УДК 666.9.022 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.10

Н. О. ДОРОГАНЬ
кандидат технічних наук, доцент,
старший викладач кафедри хімічної технології композиційних матеріалів
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-4304-1297

Л. П. ЧЕРНЯК
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри хімічної технології композиційних матеріалів
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-8479-0545

ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛІКАТНИХ СИСТЕМ З ТЕХНОГЕННОЮ СИРОВИНОЮ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЦЕМЕНТУ

Виробництво цементу відзначається великою ресурсоємністю та базується на використанні природної сировини, родовища якої є вичерпними та невідновлювальними. З цим пов'язана актуальність проблеми заміни природної сировини відходами інших галузей промисловості як техногенною сировиною.

Досліджено силікатні системи для виготовлення цементу на основі композицій різновидів природної та техногенної сировини. Як техногенну сировину використано багатотоннажні відходи агропромисловості – рисову лузгу та теплоенергетики – золу виносу. В роботі комплексно використовувались методи фізико-хімічного аналізу силікатів та стандартизовані технологічні тестування властивостей в'яжучого матеріалу. Розрахунки складу сировинних сумішей проводили із застосуванням комп'ютерної програми «РоманЦем».

Відзначено особливості хіміко-мінералогічного складу рисової лузги як джерела аморфного кремнезему підвищеної реакційної здатності та золи виносу з підвищеним вмістом оксидів заліза і розвиненою склофазою. Проведено розрахунки можливої концентрації вказаної техногенної сировини у сумішах при заданих значеннях гідравлічного і кремнеземного модулів цементу. На основі аналізу комп'ютерних розрахунків визначено нові склади вихідних сировинних сумішей на основі систем вапняк-каолін-рисова лузга та вапняк – рисова лузга – зола виносу із вмістом від 20,0 до 48,5 мас. % компонентів техногенного походження.

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

Зроблено висновок, що оцінка можливості та ступеню ефективності використання окремих різновидів техногенної сировини як компонента силікатних систем має враховувати особливості їх агрегатного стану, хіміко-мінералогічного складу та реакційної здатності в процесах фізико-хімічних перетворень в технологічних циклах. При цьому науково обґрунтоване використання відходів промисловості дає можливість комплексного вирішення задач ресурсозбереження та хімічної технології силікатів.

Ключові слова: *цемент, лузга рисова, зола виносу, суміш сировинна, фази кристалічні, властивості.*

N. O. DOROGAN
PhD, Associate Professor,
Senior Lecturer at the Department of Chemical Technology
of Composite Materials
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-4304-1297

L.P. CHERNYAK
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Chemical Technology
of Comosite Materials
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0001-8479-0545

© Дорогань Н. О., Черняк Л. П., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

RESEARCH OF SILICATE SYSTEMS WITH TECHNOGENIC RAW MATERIALS FOR CEMENT PRODUCTION

Cement production is characterized by high resource intensity and is based on the use of natural raw materials, the deposits of which are exhaustible and non-renewable. This makes the problem of replacing natural raw materials with waste from other industries as man-made raw materials relevant.

Silicate systems for the production of cement based on compositions of various natural and man-made raw materials were investigated. As man-made raw materials, high-tonnage waste from the agricultural industry – rice husk and from the heat and power industry – fly ash were used. The work comprehensively used methods of physicochemical analysis of silicates and standardized technological testing of the properties of the binder material: Calculations of the composition of raw material mixtures were carried out using the computer program "RomanCem".

The peculiarities of the chemical and mineralogical composition of rice husk as a source of amorphous silica with increased reactivity and fly ash with an increased content of iron oxides and a developed glass phase are noted. Calculations of the possible concentration of the specified technogenic raw materials in raw material mixtures at given values of the hydraulic and silica moduli of cement were carried out.Based on the analysis of computer calculations, new compositions of the initial raw material mixtures were determined based on the systems limestone-kaolin-rice husk and limestone-rice husk-fly ash with a content of 20.0 to 48.5 wt.% of components of technogenic origin.

The features of the phase composition of cement from raw material mixtures based on the studied silicate systems during firing at a maximum temperature of 1100 °C and the possibility of regulating the properties of the mineral binder by varying the developed compositions of the initial mixtures are shown.

It is concluded that the assessment of the possibility and degree of effectiveness of using individual varieties of technogenic raw materials as a component of silicate systems should take into account the peculiarities of their aggregate state, chemical and mineralogical composition, and reactivity in the processes of physicochemical transformations in technological cycles. At the same time, scientifically based use of industrial waste makes it possible to comprehensively solve the problems of resource conservation and chemical technology of silicates.

Key words: *cement, rice husk, fly ash, raw material mixture, crystalline phases, properties.*

Постановка проблеми

Цемент є найпоширеним в'яжучим матеріалом для зведення споруд різного призначення, в тому числі фортифікаційних. Разом з тим виробництво цементу відзначається великою ресурсоємністю та базується на використанні природної сировини, родовища якої є вичерпними та не відновлювальними. З цим пов'язана актуальність проблеми заміни природної сировини відходами інших галузей промисловості як техногенною сировиною, що потребує відповідних досліджень по розробці нових складів сировинних сумішей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сполучення та фізико-хімічна взаємодія оксидів кремнію, алюмінію, кальцію, заліза є основою технологічних процесів отримання силікатних матеріалів і виробів різного призначення [1, 2]. Джерелом цих оксидів у діючих виробництвах є породоутворюючі мінерали природної сировини, різновиди та концентрація яких визначають особливості структуроутворення силікатних систем в технологічних процесах.

У виробництві цементного клінкеру – основної складової частини кінцевого продукту використовують значні обсяги природної карбонатної та глинистої сировини [3,4], що через вичерпність та невідновлюваність таких родовищ не відповідає сучасним вимогам ресурсозбереження та стабільного розвитку. В цьому зв'язку зростає актуальність заміни компонентів природного походження на відходи інших галузей промисловості як техногенну сировину [5–7].

При цьому згідно з критеріями вибору сировини для силікатних виробництв [8–10] серед багатотоннажних відходів привертають увагу рисова лузга [11, 12] та зола виносу ТЕС [13, 14]. Вказується, що при виготовленні 1 кг білого рису утворюється 0.28 кг рисової лузги як побічний продукт виробництва в процесі помелу. Як наслідок, при річному виробництві 750 млн. т рису в світі утворюється понад 150 млн. т відходів. При цьому рисова лузга може стати джерелом аморфного діоксиду кремнію як активатору фізико – хімічних процесів структуроутворення силікатних систем [15, 16].

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 [18]. Як активна мінеральна добавка при помелі клінкеру застосовуються у виробництві цементів, головним чином композиційних.

Проте фактичні обсяги утилізації вказаних відходів агропромисловості та теплоенергетики не відповідають кількісному рівню їх утворення та накопичення. В цьому зв'язку очевидна доцільність і перспективність

використання таких відходів як вихідної техногенної сировини у масоємному виробництві цементу, що потребує поглибленого дослідження складу та структуроутворення відповідних силікатних систем.

Викладення основного матеріалу дослідження

Об'єктом дослідження стали силікатні системи для виготовлення цементу на основі композицій природної та техногенної сировини різного генезису.

Сировинні суміші готували шляхом дозування компонентів за масою, змішування та гомогенізації в кульовому млині, випалу та подрібнення кінцевого продукту відповідно до сучасної технології цементу.

Зразки сировинних сумішей випалювали в печі протягом 15 годин при максимальній температурі 1100 °С, витримуючи при максимумі 1,5 години. Методи фізико-хімічного аналізу силікатної сировини та випробування властивостей в'яжучого матеріалу, які використовувались у цій роботі, включали:

– аналіз хімічного складу із застосуванням стандартизованих процедур;

– рентгенівський дифракційний аналіз (порошкоподібні препарати) за допомогою дифрактометру ДРОН-4-0, підключеного через інтерфейс до комп'ютера, що дозволило проводити зйомку дифрактограм в чисельному вигляді в діапазоні 2–70 2Θ; час експонування кожної точки – 6 секунд. При розшифровці фазового складу використовували базу даних Міжнародного комітету порошкових дифракційних стандартів (JCPDS);

– визначення показників властивостей цементу відповідно до діючих стандартів.

Для визначення раціональних складів вихідної суміші було застосовано різновиди природної та техногенної сировини:

– вапняк Дубовецького родовища Івано-Франківської області;

– каолін КС-1 Глухівецького родовища Вінницької області;

– лузга – відходи переробки рису ТОВ «Рис України» Херсонської області;

– зола виносу – відходи Бурштинської ТЕС Івано-Франківської області.

Серед досліджуваної сировини за хімічним складом (табл. 1) вапняк характеризується найбільшим вмістом оксиду кальцію, каолін та зола виносу – більшим вмістом оксидів кремнію та алюмінію при відмінності в їх кількісному співвідношенні (1,3 проти 2,6), при цьому зола виносу має найбільшу кількість оксидів заліза.

Таблиця 1

Хімічний склад сировини

Назва проби	Вміст оксидів, мас. %									
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	в.п.п
вапняк	3,13	0,06	1,05	–	52,82	0,52	0,10	–	–	42,32
каолін	47,20	36,22	0,32	1,26	0,31	0,22	0,24	0,65	0,47	13,0
рисова лузга	15,64	0,24	0,12	–	0,61	0,45	0,18	0,48	0,28	82,0
Зола виносу	46,12	18,00	22,17	1,78	4,03	1,46	0,21	–	2,10	1,49

Хімічний склад мінеральної складової рисової лузги характеризується переважним вмістом оксиду кремнію, а підвищені втрати маси при прожарюванні (в.п.п) пов'язані з органічною складовою з целюлози $(C_6H_{10}O_5)_n$ та лігнину $(C_{31}H_{34}O_{11})_n$.

За мінералогічним складом вапняк характеризується переважним вмістом кальциту $CaCO_3$, каолініту $2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot H_2O$.

Аналіз мінералогічного складу досліджуваної техногенної сировини показав (рис. 1, 2), що рисова лузга містить аморфний кремнезем з включеннями кристалічного кварцу і кальциту, а зола виносу відзначається наявністю склофази та кристалічних фаз, головним чином – кварцу, муліту.

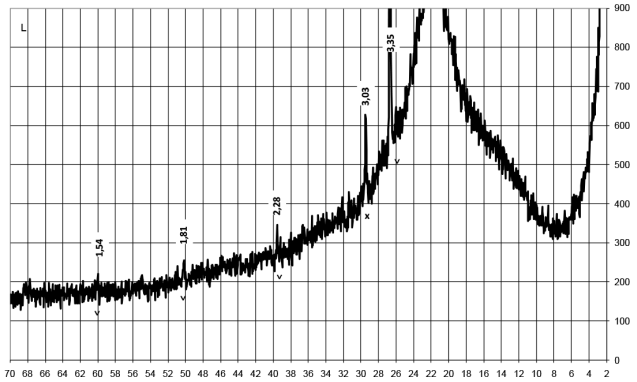


Рис. 1. Дифрактограма рисової лузги: *v* – кварц; *x* – кальцит

За результатами розрахунків із застосуванням комп'ютерної програми «РоманЦем» [20] встановлено, що при використанні системи вапняк-лузга-каолін в інтервалі значень гідравлічного модуля НМ = 1,10–1,70 при введені 10 мас. % каоліну КС-1 можливий вміст рисової лузги становить від 36,6 до 52,0 мас. %, а при введенні 20 мас. % КС-1 – від 10,2 до 30,2 мас. % (рис. 3).

Відповідно до змін кількісного співвідношення компонентів та хімічного складу сировинних сумішей кремнеземистий модуль в'яжучого *n* становить від 2,8 до 3,3 при вмісті 10 мас. % каоліну та від 1,6 до 2,0 при вмісті 20 мас. % каоліну (рис. 4).

Згідно з проведеними розрахунками та аналізом для дослідження особливостей фазового складу та властивостей мінерального в'яжучого з досліджуваної сировини було обрано суміші 15L, 16L на основі системи вапняк-рисова лузга-каолін та 18L, 19L на основі системи вапняк-рисова лузга-зола виносу (табл. 2).

Досліджувані суміші характеризуються відмінностями хімічного складу (табл. 3). Так, суміші 18L, 19L із золою виносу відрізняються від 15L, 16L із каоліном більшим кількісним співвідношенням оксидів: $SiO_2 : Al_2O_3$,

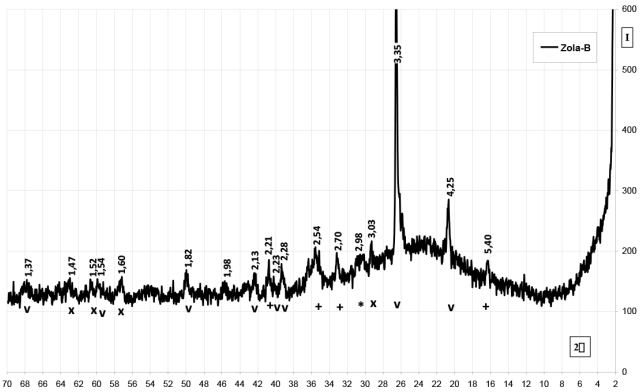


Рис. 2. Дифрактограма золи виносу: *v* кварц, + муліт, *x* кальцит

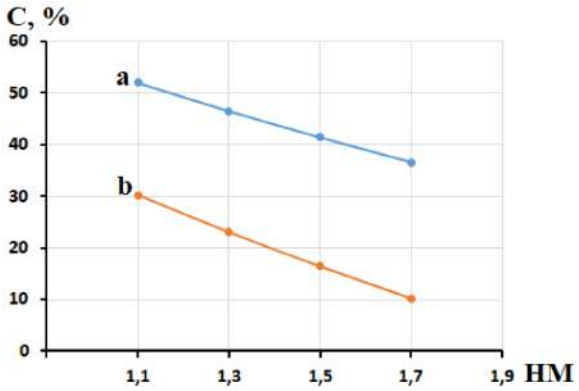


Рис. 3. Залежність вмісту рисової лузги (С) в системі вапняк-лузга-каолін від гідравлічного модуля НМ при введені каоліну 10 мас. %. (a) і 20 мас. % (b)

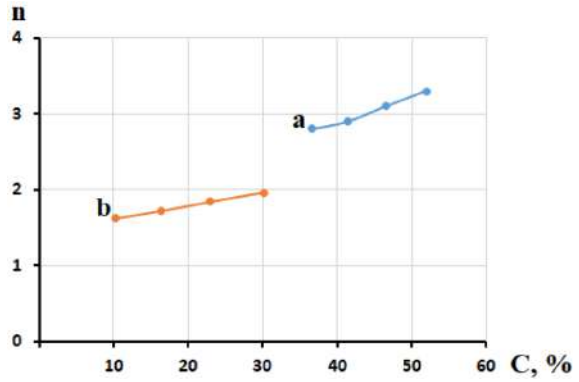


Рис. 4. Залежність кремнеземного модуля *n* від вмісту рисової лузги (*C*) в системі вапняк-лузга-каолін при введені каоліну 10 (*a*) і 20 (*b*) мас. %

Таблиця 2

Склад сировинних сумішей

Код проби	Вміст компонентів, мас. %			
	вапняк	лузга рисова	каолін КС-1	зола виносу
15L	63,5	20,0	16,5	–
18L	64,0	20,0	–	16,0
16L	51,5	40,0	9,0	–
19L	51,5	40,0	–	8,5

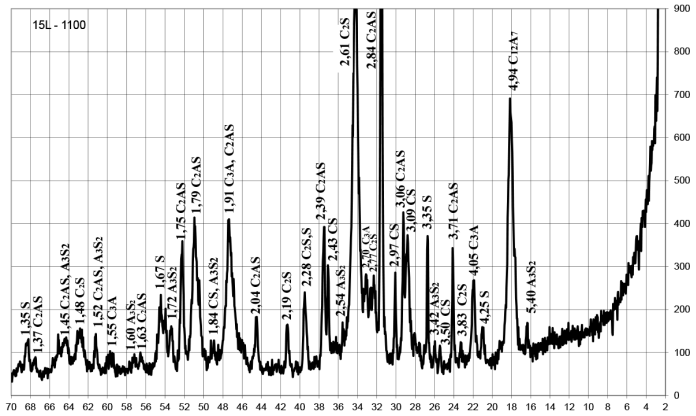
Таблиця 3

Хімічний склад сировинних сумішей

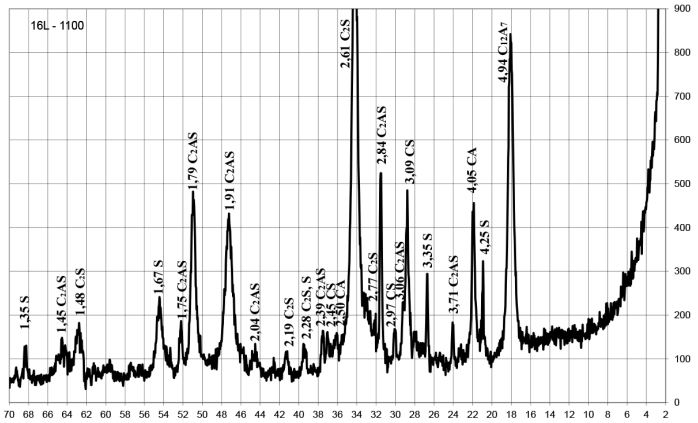
Код проби	Вміст оксидів, мас. %						
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	в.п.п
15L	13,02	6,13	0,74	33,84	0,46	0,14	45,67
18L	12,91	3,11	4,41	34,77	0,67	0,13	44,00
16L	12,12	3,36	0,62	27,32	0,47	0,14	55,92
19L	12,05	1,75	2,58	27,87	0,58	0,14	55,03

що становить 4,2–6,9 проти 2,1–3,6 та вказує на меншу тугоплавкість. При приблизно однаковому кількісному співвідношенні оксидів CaO : SiO_2 = 2,2–2,7, що вказує на вірогідність утворення при випалі кристалічних фаз силікатів кальцію, суміші із золою виносу відрізняються більшим кількісним співвідношенням оксидів CaO : Al_2O_3 (11,2–15,9 проти 5,5–8,1), що вказує на вірогідність утворення при випалі кристалічних фаз алюмінатів та алюмосилікатів кальцію.

Рентгенофазовий аналіз дозволив виявити деякі особливості фазових перетворень при випалі досліджуваних сумішей (рис. 5, 6).

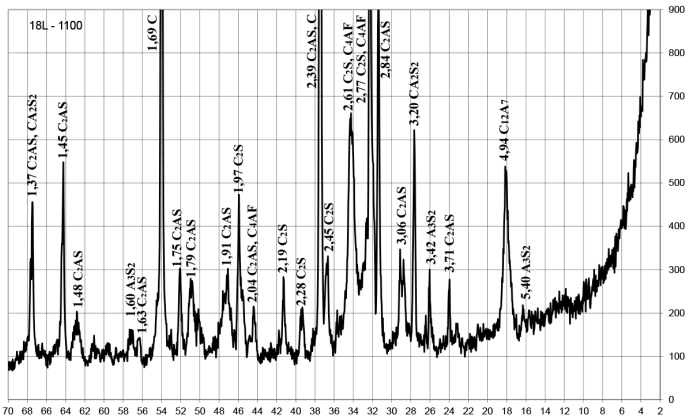


a

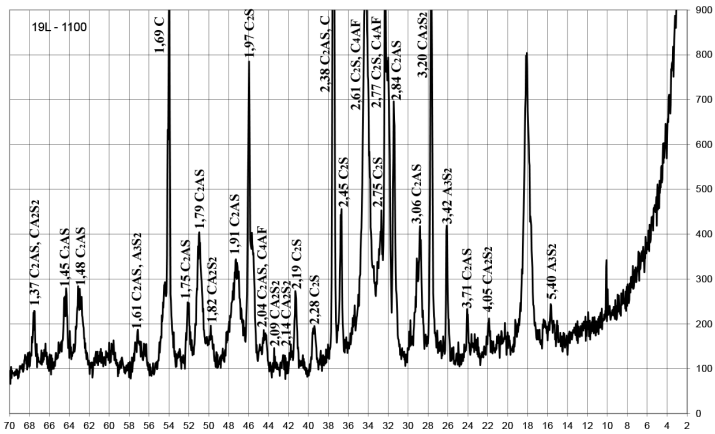


b

Рис. 5. Дифрактограми проб 15L (a), 16L (b) (1100 °C)



a



b

Рис. 6. Дифрактограма проб 18L (a), 19L (b) (1100 °C)

Так, після випалу з максимальною температурою 1100 °C матеріал із суміші 16L у порівнянні з 15L відрізняється:

- щодо кристалічних фаз силікатів кальцію – при приблизно одноковому утворенні C_2S (2,7, 2,61 Å) меншим розвитком CS (2,97 Å);
- щодо кристалічних фаз алюмосилікатів кальцію – меншим утворенням геленіту C_2AS (2,84, 3,06, 1,75 Å);
- щодо кристалічних фаз алюмінатів кальцію – інтенсифікацією утворення майєніту $C_{12}A_7$ (4,90 Å) та CA (4,05 Å);
- мінімізацією утворення муліту A_3S_2 (5,40, 3,42 Å).

Проби 18L, 19L відзначаються суттєвим вмістом CaO (1,69, 2,38 Å), при цьому 19L у порівнянні з 18L відрізняється:

- щодо кристалічних фаз силікатів кальцію – більшим утворенням C_2S (2,75, 2,61, 197 Å);
- щодо кристалічних фаз алюмосилікатів кальцію – меншим утворенням геленіту C_2AS (2,84, 3,71, 1,75 Å) при інтенсифікації розвитку анортиту CAS_2 (3,20, 4,04, 1,79 Å);
- щодо кристалічних фаз алюмінатів кальцію – інтенсифікацією утворення майєніту $C_{12}A_7$ (4,90 Å).

Отримані результати технологічних випробувань проб на основі досліджуваних силікатних систем після випалу на 1100 °C свідчать про відмінності їх в'яжучих властивостей (табл. 4).

Згідно класифікації ДСТУ Б В.27-91-99 [21] за швидкістю тужавлення проби в'яжучого 15L і 16L з 20–40 мас. % лузги відноситься до групи нормальнотужавіючих (термін початку від 45 хв. до 2 годин), характерними представниками якої вважаються портландцемент і шлакопортландцемент.

Проби 18L, 19L із комплексним застосуванням рисової лузги та золи виносу відносяться до груп надшвидкотужавіючих (18L), характерними представниками якої вважаються розширювальні та напрягаючий цементи, і швидкоотужавіючих (19L), характерними представниками якої вважаються ангідритовий та глиноземистий цементи.

Щодо механічних властивостей, зразки 18L, 19L із сумішей зі золою виносу відносяться за ДСТУ до групи середньої міцності, характерної для портландцементу з добавками та шлакопортландцементу, і перевищують зразки 15L, 16L із сумішей з каоліном. Це повязується із вказаними відмінностями кристалічних фаз, розподілених у зразках із золою виносу в більш розвиненій склофазі.

Таблиця 4

Властивості в'яжучого матеріалу

		15L	18L	16L	19L
Тонкість помелу, залишок на ситі 008, мас. %		7	7	8	8
Густота, %		30	32	30	34
Терміни тужавлення, хв.	початок	55	10	55	20
	кінець	260	20	270	50
Міцність на стиск через 28 діб, МПа		23,8	31,4	23,0	35,5

Висновки

Оцінка можливості та ступеню ефективності використання окремих різновидів техногенної сировини як компонента силікатних систем має враховувати особливості їх агрегатного стану, хіміко-мінералогічного складу та реакційної здатності в процесах фізико-хімічних перетворень в технологічних циклах.

В цьому зв'язку досліджені відходи промисловості у силікатних системах для виготовлення цементу здатні суттєво впливати на процеси спікання та фазові перетворення при випалі за рахунок аморфного кремнезему рисової лузги, оксидів заліза та склофази золи виносу.

Встановлено можливість отримання різновиду цементу низькотемпературного випалу (≤ 1200 °C) із варіюванням в'яжучих властивостей на основі систем крейла-каолін-рисова лузга та крейда-рисова лузга-зола виносу при використанні у вихідних сумішах від 20,0 до 48,5 мас. % техногенної сировини.

Список використаної літератури

1. Liebau F. (1985). Structural Chemistry of Silicates. Structure, Bonding, and Classification. Berlin, Heidelberg: Springer.
2. Гречанюк В. (2006). Фізична хімія і хімія силікатів. Київ : Кондор.
3. Duda, W. H. (1988). Cement Data Book, Volume 3: Raw Material for Cement Production. French & European Pubns. 188 с.
4. Рунова Р. Ф., Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Носовський Ю. Л. (2012). В'яжучі речовини. Київ : Основа. 446 с.
5. Allen, D. T., & Benmanesh, N. (1994). Wastes as Raw Materials. In The Greening of Industrial Ecosystems (pp. 69–89). Washington: National Academy Press. https://www.nap.edu/read/2129/chapter/7
6. Bhatia, H. S. (2020). A Comprehensive Book on Industrial Waste and Its Management. Delhi (India) : The Readers Paradise. 250 с.
7. 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
8. Черняк Л. П. (2003). Критерії вибору сировини для сучасного виробництва будівельної кераміки. Будівельні матеріали та вироби, № 1, С. 2–4; № 2, С. 6–8.
9. Ghosh S. N. (2003). Advances in Cement Technology: Chemistry, Manufacture and Testing. Taylor & Francis. 828 с.
10. Winter, N. B. (2012). Understanding Cement. WHD Microanalysis Consultants Ltd. 206 с.
11. Masoumeh Kordi, Naser Farrokhi, Martin I. Pech-Canul, & Asadollah Ahmadikhah. (2024). Rice Husk at a Glance: From Agro-Industrial to Modern Applications. Rice Science, 31(1), 14–32.
12. Maryoto, A., & Sudibyo, G. H. (2018). Rice husk as an alternative energy for cement production and its effect on the chemical properties of cement. MATEC Web of Conferences, 195, 01009.
13. Kar, K. K. (2021). Handbook of Fly Ash. Elsevier. 868 с.
14. Alterary, S. S., & Marei, N. H. (2021). Fly ash properties, characterization, and applications: A review. Journal of King Saud University, 33(6).
15. Sun, L., & Gong, K. (2001). Silicon-based materials from rice husks and their applications. Industrial & Engineering Chemistry Research, 40(25), 5861–5877. DOI: 10.1021/ie010284b
16. Real, C., Alcala, M. D., & Criado, J. M. (1996). Preparation of Silica from Rice Husks. Journal of the American Ceramic Society, 79(8), 2012–2016.
17. Kou, S., Poon, C., & Chan, D. (2007). Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. Materials in Civil Engineering, 19, 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. ДСТУ Б В.2.7-205:2009. Золи-виносу теплових електростанцій для бетонів. Технічні умови. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 12 с.

20. Свідерський, В. А., Черняк, Л. П., Сангінова, О. В., Дорогань, Н. О., Цибенко М.Ю. (2017). Програмне забезпечення технології низькотемпературних в'яжучих матеріалів. Будівельні матеріали та вироби, №1–2(93), 22–24.

21. ДСТУ Б В.2.7-91-99. В'яжучі мінеральні. Класифікація. Київ : Держбуд України, 1999. 26 с.

References

1. Liebau F. (1985) Structural chemistry of silicates. Structure, bonding, and classification. Berlin, Heidelberg : Springer, 347 p.

2. Hrechaniuk V. (2006) Fizychna khimiia i khimiia sylikativ [Physical chemistry and chemistry of silicates]. Kyiv : Kondor, 320 p. (in Ukrainian).

3. Duda W. H. (1988) Cement data book, Volume 3: Raw material for cement production. French & European Pubns, 188 p.

4. Runova R. F., Dvorkin L. Y., Dvorkin O. L., Nosovskyi Yu. L. (2012) Viazhuchi rechovyny [Binders]. Kyiv : Osnova, 446 p. (in Ukrainian).

5. Allen D. T., Benmanesh N. (1994) Wastes as raw materials. In: The greening of industrial ecosystems, pp. 69–89. Washington : National Academy Press. Available at: https://www.nap.edu/read/2129/chapter/7 (accessed 26 September 2025).

6. Bhatia H. S. (2020) A comprehensive book on industrial waste and its management. Delhi (India) : The Readers Paradise, 250 p.

7. 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, vol. 4, no. 4, pp. 317–324. Available at: https://www.ripublication.com/ijerd_spl/ijerdv4n4spl_08.pdf (accessed 26 September 2025).

8. Chernyak L. P. (2003) Kryterii vyboru syrovyny dlia suchasnoho vyrobnytstva budivelnoi keramiky [Criteria for choosing raw materials for modern production of building ceramics]. Budivelni materialy ta vyroby [Building materials and products], no. 1, pp. 2–4; no. 2, pp. 6–8. (in Ukrainian).

9. Ghosh S. N. (2003) Advances in cement technology: Chemistry, manufacture and testing. Taylor & Francis, 828 p.

10. Winter N. B. (2012) Understanding cement. WHD Microanalysis Consultants Ltd, 206 p.

11. Kordi M., Farrokhi N., Pech-Canul M. I., Ahmadikhah A. (2024) Rice husk at a glance: From agro-industrial to modern applications. Rice Science, vol. 31, no. 1, pp. 14–32.

12. Maryoto A., Sudibyo G. H. (2018) Rice husk as an alternative energy for cement production and its effect on the chemical properties of cement. MATEC Web of Conferences, vol. 195, 01009.

13. Kar K. K. (2021) Handbook of fly ash. Elsevier, 868 p.

14. Alterary S. S., Marei N. H. (2021) Fly ash properties, characterization, and applications: A review. Journal of King Saud University, vol. 33, no. 6.

15. Sun L., Gong K. (2001) Silicon-based materials from rice husks and their applications. Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 40, no. 25, pp. 5861–5877. DOI: 10.1021/ie010284b

16. Real C., Alcala M. D., Criado J. M. (1996) Preparation of silica from rice husks. Journal of the American Ceramic Society, vol. 79, no. 8, pp. 2012–2016

17. Kou S., Poon C., Chan D. (2007) Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. Materials in Civil Engineering, vol. 19, pp. 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, vol. 42, pp. 1863–1872.

19. Zoly-vynosu teplovykh elektrostantsii dlia betoniv. Tekhnichni umovy [Fly ash from thermal power plants for concrete. Technical conditions]. DSTU B V.2.7-205:2009. Kyiv: Minrehionbud of Ukraine, 12 p. (in Ukrainian).

20. Sviderskyy V. A., Chernyak L. P., Sanginova O. V., Dorohan N. O., Tsybenko M. Yu. (2017) Prohramne zabezpechennia tekhnolohii nyzkotemperaturnykh viazhuchykh materialiv [Software for low-temperature binder technology]. Budivelni materialy ta vyroby [Building materials and products], no. 1–2(93), pp. 22–24. (in Ukrainian).

21. Viazhuchi mineralni. Klasyfikatsiia [Mineral binders. Classification]. DSTU B V.2.7-91-99. Kyiv : Derzhbud Ukrainy, 26 p. (in Ukrainian).

Дата першого надходження рукопису до видання: 20.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 16.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025