

О. В. ХРИСТИЧ, А. М. КОРОГОДСЬКА, Г. М. ШАБАНОВА, О. О. ГАПОНОВА, М. О. ХРИСТИЧ
РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУР ТА СКЛАДІВ ЕВТЕКТИК ПОЛІКОМПОНЕНТНИХ ПЕРЕРІЗІВ
СИСТЕМИ $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$

У роботі наведено результати оцінки максимальних температур та складів евтектик технологічно значущих перерізів системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$, перспективні з точки зору отримання на основі їх композицій вогнетривких в'язучих з комплексом заданих спеціальних властивостей. Для побудови поверхонь ліквідусу бінарних і потрійних евтектичних систем використовували метод Епштейна-Хауленда, який широко використовують у технології тугоплавких неметалевих силікатних матеріалів. За результатами попередніх досліджень визначено, що тетраедри системи $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} - \text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ та $\text{CaAl}_2\text{O}_4 - \text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ мають найбільший відносний об'єм і найменший ступінь асиметрії, вони є оптимальними з точки зору розробки складів вогнетривких матеріалів з комплексом заданих властивостей. Фази, що входять до складу даних тетраедрів, мають високу ймовірність існування в системі $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$, що дозволить розробити стійку технологію глиноземистих цементів. На підставі виконаних розрахунків та проведеного аналізу температур і складів евтектик системи визначено необхідність варіювати в складі цементу вміст CaAl_2O_4 , CoAl_2O_4 та NiAl_2O_4 , як найбільш гідралічно активного і вогнетривких компонентів. Для підвищення температури експлуатації склад в'язучої композиції необхідно коригувати у бік збільшення кількості CaAl_4O_7 для незмінних значень міцності, тоді як у композиційному вогнетривкому матеріалі доцільно збільшувати вміст шпінельних фаз як компонентів заповнювача. Визначено, що композиції досліджених перерізів можуть бути використані за температур експлуатації понад 1475°C . Варіюванням виду та фазового складу цементу можливо отримувати вогнетривкі матеріали широкого температурного спектру експлуатації для використання їх у теплонапружених ділянках високотемпературних агрегатів.

Ключові слова: склад евтектик, температура спікання, шпінельвмісні глиноземні матеріали, композиційні матеріали, багатокомпонентні оксидні системи

О. В. ХРИСТЫЧ, А. М. КОРОГОДСКА, Г. М. ШАБАНОВА, О. О. ГАПОНОВА, М. О. ХРИСТЫЧ

CALCULATION OF TEMPERATURES AND COMPOSITIONS OF EUTECTS OF POLYCOMPONENT SECTIONS OF THE SYSTEM $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$

The paper presents the results of estimating the maximum temperatures and compositions of eutectics of technologically significant sections of the $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$ system, which are promising from the point of view of obtaining refractory binders with a set of specified special properties based on their compositions. The Epstein-Howland method, which is widely used in the technology of refractory non-metallic silicate materials, was used to construct the liquidus surfaces of binary and ternary eutectic systems. According to the results of preliminary studies, it was determined that the tetrahedra of the $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} - \text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ and $\text{CaAl}_2\text{O}_4 - \text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ systems have the largest relative volume and the lowest degree of asymmetry, and they are optimal from the point of view of developing refractory materials with a set of specified properties. The phases that make up these tetrahedra have a high probability of existence in the $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$ system, which will allow the development of a sustainable technology for alumina cements. Based on the calculations performed and the analysis of the temperatures and compositions of the system's eutectics, it was determined that it is necessary to vary the content of CaAl_2O_4 , CoAl_2O_4 and NiAl_2O_4 in the cement as the most hydraulically active and refractory components. To increase the operating temperature, the composition of the binder composition should be adjusted towards an increase in the amount of CaAl_4O_7 for unchanged strength values, while it is advisable to increase the content of spinel phases as aggregate components in the composite refractory material. It was determined that the compositions of the studied sections can be used at operating temperatures above 1475°C . By varying the type and phase composition of cement, it is possible to obtain refractory materials of a wide temperature range of operation for use in heat-stressed areas of high-temperature units.

Keywords: composition of eutectics, sintering temperature, spinel-containing alumina materials, composite materials, multicomponent oxide systems

Вступ. Сучасні вимоги, яким мають задовольняти новітні вогнетривкі матеріали, включають високий рівень експлуатаційних властивостей та відповідність технологій виробництва екологічним параметрам, являють собою низку нових знань і технологічних рішень. Значною мірою таким вимогам відповідають нові вогнетривкі шпінельвмісні матеріали з комплексом необхідних експлуатаційних характеристик на основі композицій системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$.

Проведені теоретичні дослідження, щодо субсолідусної будови чотирикомпонентної оксидної системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$ дозволили встановити області, перспективні з точки зору отримання на основі їх композицій вогнетривких в'язучих з комплексом заданих спеціальних властивостей, так і композиційних вогнетривких матеріалів на їх основі [1]. Відомо, що наявність у

складах цементних композицій чистих оксидів є небажаним, оскільки можливим є їх подальше перетворення у процесах служби, тому з технологічної точки зору розгляд перерізів, які містять дані фази є недоцільним. Авторами обрано області, які містять технологічно значущі фази, $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} - \text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ та $\text{CaAl}_2\text{O}_4 - \text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$, що зумовлює розробку спеціальних в'язучих матеріалів саме на основі сполук обраних перерізів [2, 3].

Вогнетривкі модифіковані композиції на основі сполук системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$ пропонується використовувати за високих температур у відповідних захисних ділянках теплових агрегатів або для виготовлення жаростійких конструкцій, що вимагає проведення оцінки максимальних температур експлуатації. Визначення температур та складів

евтектик важливе і для прогнозу температур синтезу матеріалів.

Мета роботи - розрахунок температур та складів евтектик перспективних полікомпонентних перерізів системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$ та аналіз отриманих результатів для визначення максимальної температури синтезу та максимально можливої температури експлуатації вогнетривких композицій на основі сполук визначеної системи.

Теоретичні положення та методи досліджень.

Відзначено, що при гідратації таких цементів основними гідралічно активними сполуками є алюмінати кальцію. Утворення при їх твердінні гідроалюмінатів різного ступеня активності надає цементному каменю високу міцність, стійкість по відношенню до впливу агресивних сульфатних середовищ, а наявність алюмінату кобальту обумовлюватиме підвищення температури експлуатації, високу електрохімічну стабільність, в той час як наявність нікелевої шпінелі додає виняткову твердість і стабільність, стійкості до механічного зносу. До того ж, обидві шпінелі можуть додати унікальні спеціальні властивості - магнітні та електропровідні а також знаходять застосування в галузі зберігання і перетворення енергії.

На підставі раніше проведених геометро-топологічних досліджень [3, 4] даної системи найбільший відносний об'єм і найменший ступінь асиметрії мають тетраедри $\text{CaAl}_2\text{O}_4 - \text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ та $\text{CaAl}_2\text{O}_4 - \text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$, що зумовлює розробку спеціальних в'язучих матеріалів саме на основі сполук обраних тетраедрів. Фази, що входять до складу даних тетраедрів, мають високу ймовірність існування в системі $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$, що дозволить розробити стійку технологію глиноземистих цементів без спеціальних прийомів щодо забезпечення високої точності дозування вихідних компонентів.

Результати розрахунків та їх обговорення. Для проведення розрахунків в бінарних перерізах

найбільш прийнятним є метод Епштейна – Хоуланда, а у три- та чотирикомпонентних перерізах – рішення системи нелінійних рівнянь [5, 6]. Подібні методи розрахунку широко використовуються в технології тугоплавких неметалевих матеріалів.

Вихідні дані для розрахунку представлені в табл. 1.

Таблиця 1 - Вихідні дані для розрахунку поверхонь ліквідусу перерізів оксидної системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$

Сполука	Температура		Кількість атомів в сполуці, N
	K	°C	
CaAl_2O_4	1875	1602[7]	7
CaAl_4O_7	2023	1750 [7]	12
$\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$	2176	1903[8]	32
NiAl_2O_4	2293	2020 [9,10]	7
CoAl_2O_4	2253	1980 [9-12]	7

Результати розрахунку температур і складів евтектик в оптимальних чотирикомпонентних перерізах багатокомпонентної системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$ представлені в табл. 2 – 3. Положення евтектик у потрійних та чотирикомпонентних перерізах обраної системи та на рисунках 1 - 4.

З отриманих результатів випливає, що для отримання вогнетривких в'язучих матеріалів з температурами експлуатації понад 1400 - 1600 °C необхідно досягати у матеріалі заданого складу. Це можливо шляхом створення спеціальних в'язучих матеріалів на основі чотирикомпонентних композицій системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$.

Результати розрахунків температури і складів евтектик в чотирикомпонентному розрізі $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} - \text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$, наведені в табл. 2.

Таблиця 2 - Характеристики евтектичних точок у перерізі $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} - \text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$

№ з/п	Евтектичний переріз	$T_{\text{евт}}, ^\circ\text{C}$	Склад евтектики, мол. %			
			X_1	X_2	X_3	X_4
1	$\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} - \text{CoAl}_2\text{O}_4$	1838	37,6	62,4	-	-
2	$\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} - \text{NiAl}_2\text{O}_4$	1848	43,5	56,5	-	-
3	$\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} - \text{CaAl}_4\text{O}_7$	1738	7,2	92,8	-	-
4	$\text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$	1690	69,2	30,8	-	-

5	$\text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{CoAl}_2\text{O}_4$	1682	65,7	34,3	-	-
6	$\text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$	1795	53,4	46,6	-	-
7	$\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$	1763	11,1	47,5	41,4	-
8	$\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{CaAl}_4\text{O}_7$	1648	1,4	29,8	68,8	-
9	$\text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$	1633	47,9	28,0	24,1	-
10	$\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} - \text{NiAl}_2\text{O}_4 - \text{CaAl}_4\text{O}_7$	1685	2,8	30,2	67,0	-
11	$\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} - \text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$	1631	1,1	27,7	23,9	47,3

Як видно з представлених результатів, чотирикомпонентна евтектика в перерізі $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} - \text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ зміщена до грані $\text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4 - \text{CaAl}_4\text{O}_7$ і становить 1631 °С. Найбільшу температуру мають бінарна евтектика $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ (1848 °С) та потрійна евтектика $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ (1763°С).

Схематичні зображення ліній ліквідусу чотирикомпонентного перерізу $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} - \text{CaAl}_4\text{O}_7 -$

$\text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$, наведені на рис. 1.

Результати розрахунків температури і складів евтектик в чотирикомпонентному розрізі $\text{CaAl}_2\text{O}_4 - \text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$, наведені в табл. 3.

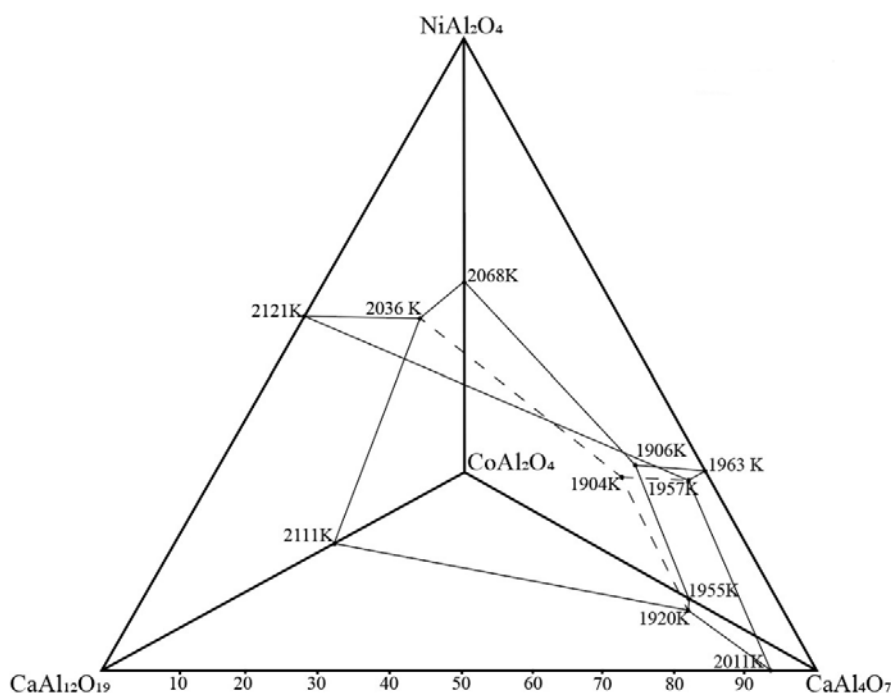


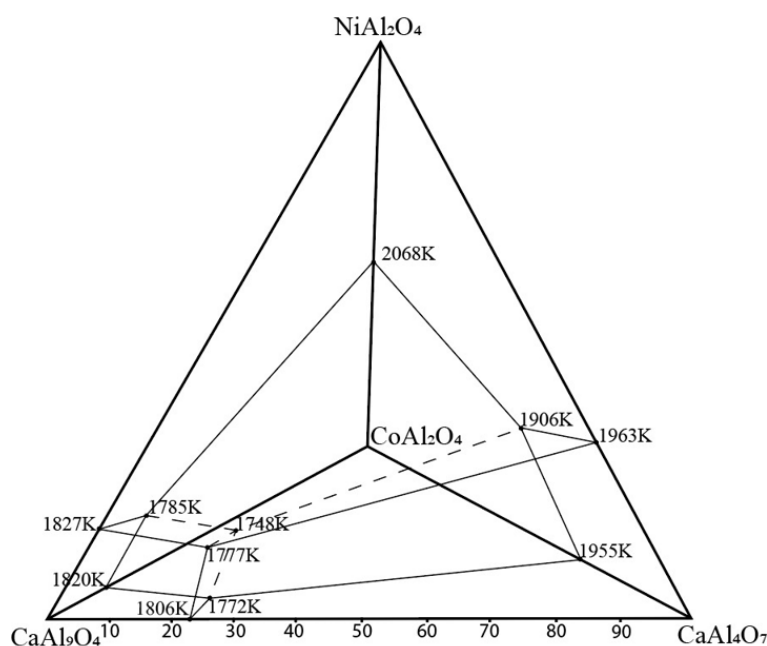
Рисунок 1 – Схематичне зображення положення евтектик у чотирикомпонентному перерізі $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} - \text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$.

Таблиця 3 - Характеристики евтектичних точок у перерізі CaAl_2O_4 - CaAl_4O_7 - CoAl_2O_4 - NiAl_2O_4

№ з\п	Евтектичний переріз	$T_{\text{евт}}, ^\circ\text{C}$	Склад евтектики, мол. %			
			X_1	X_2	X_3	X_4
1	CaAl_2O_4 - CaAl_4O_7	1533	76,5	23,5	-	-
2	CaAl_2O_4 - CoAl_2O_4	1547	81,0	19,0	-	-
3	CaAl_2O_4 - NiAl_2O_4	1554	83,2	16,8	-	-
4	CaAl_4O_7 - CoAl_2O_4	1682	65,7	34,3	-	-
5	CoAl_2O_4 - NiAl_2O_4	1795	53,4	46,6	-	-
6	CaAl_4O_7 - NiAl_2O_4	1690	69,2	30,8	-	-
7	CaAl_2O_4 - CaAl_4O_7 - CoAl_2O_4	1499	66,7	18,3	15,0	-
8	CaAl_4O_7 - CoAl_2O_4 - NiAl_2O_4	1633	47,9	28,0	24,1	-
9	CaAl_2O_4 - CoAl_2O_4 - NiAl_2O_4	1512	70,4	16,0	13,6	-
10	CaAl_2O_4 - CaAl_4O_7 - NiAl_2O_4	1540	67,9	19,0	13,1	-
11	CaAl_2O_4 - CaAl_4O_7 - CoAl_2O_4 - NiAl_2O_4	1475	60,2	15,2	13,3	11,3

Як видно з представлених результатів, чотириккомпонентна евтектика в перерізі CaAl_2O_4 - CaAl_4O_7 - CoAl_2O_4 - NiAl_2O_4 зміщена до грані CaAl_2O_4 - CaAl_4O_7 - NiAl_2O_4 і становить 1475°C . Найбільшу температуру мають бінарна евтектика CoAl_2O_4 - NiAl_2O_4 (1795°C) та потрійна евтектика CaAl_4O_7 - CoAl_2O_4 - NiAl_2O_4 (1633°C).

Схематичні зображення ліній ліквідусу чотириккомпонентного перерізу CaAl_2O_4 - CaAl_4O_7 - CoAl_2O_4 - NiAl_2O_4 системи CaO - Al_2O_3 - CoO - NiO , наведені на рис. 2

Рисунок 2 – Положення евтектик у чотириккомпонентному перерізі CaAl_2O_4 - CaAl_4O_7 - CoAl_2O_4 - NiAl_2O_4 .

Аналіз отриманих результатів дослідження бінарних, потрійних та чотириккомпонентного перерізів в системі $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$ показує, що композиційні матеріали на основі даної системи можуть використовуватися для отримання в'язучих матеріалів з температурою експлуатації 1400 - 1600 °C. Найбільш оптимальним для отримання вогнетривких в'язучих матеріалів є склад чотириккомпонентного перерізу $\text{CaAl}_2\text{O}_4 - \text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ (з температурою плавлення евтектики 1475 °C), оскільки до його складу входять сполуки з високими температурами плавлення і в'язучими властивостями. Потрійні перерізи $\text{CaAl}_2\text{O}_4 - \text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{CoAl}_2\text{O}_4$ (евтектика 1499 °C), $\text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ (евтектика 1633 °C), $\text{CaAl}_2\text{O}_4 - \text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ (евтектика 1512 °C), $\text{CaAl}_2\text{O}_4 - \text{CaAl}_4\text{O}_7 - \text{NiAl}_2\text{O}_4$ (евтектика 1540°C), які входять в зазначений потрійний переріз, також мають високі температури евтектики.

При розробці складів глиноземистих матеріалів на основі шпінельвмісних цементів системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$ розглядалися композиції як з максимальним вмістом вогнетривких фаз, так і з максимальним вмістом гідралічно активних фаз. Для створення вогнетривких композицій на основі сполук визначеної системи необхідно варіювати в складі цементу вміст CaAl_2O_4 , CoAl_2O_4 та NiAl_2O_4 як найбільш гідралічно активного і вогнетривких компонентів. Для підвищення температури експлуатації склад в'язучої композиції необхідно коригувати у бік збільшення кількості CaAl_4O_7 для незмінних значень міцності, тоді як у композиційному вогнетривкому матеріалі доцільно збільшувати вміст шпінельних фаз як компонентів заповнювача.

Висновки. Таким чином, на підставі виконаних розрахунків та проведеного аналізу температур і складів евтектик трикомпонентних та чотириккомпонентних перерізів системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$, композиції досліджених перерізів можуть бути використані за температур експлуатації понад 1475 °C.

За результатами проведених розрахунків температур та складів евтектик бінарних, потрійних та чотириккомпонентних перерізів системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$ визначено принципи регулювання якісного та кількісного складу глиноземистих шпінельвмісних матеріалів, синтезованих на основі визначеної системи. Варіюванням виду та фазового складу цементу можливо отримувати вогнетривкі матеріали широкого температурного спектру експлуатації для використання їх у теплонапружених ділянках високотемпературних агрегатів. Розрахункові відомості мають важливе значення для практики обґрунтованого вибору температур спікання досліджуваних складів композицій. Доведено використання складів раціональної області для отримання матеріалів з підвищеною температурою експлуатації, які можуть бути використані в різних

галузях промисловості для захисних ділянок теплових агрегатів або для виготовлення жаростійких конструкцій, конструкційної та функціональної кераміки.

Список літератури

1. Logvinkov S.M., Shabanova G.N., Korohodskaya A.N., Khrystych O.V. Modified Alumina Cement with High Service Properties. *China's Refractories*. 2016. Vol. 25, No. 4. P. 1-5. <http://www.cnref.cn/EN/Y2016/V25/I4/1>
2. Khrystych O.V., Shabanova G. N., Korogodskaya A. N., Logvinkov S.M., Mykhailova E.A. Physico-chemical basics of creating alumina cements based on nickel and cobalt spinel. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2024. No. 5. P. 262-271. <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2024-156-5-85-90>
3. Христич О.В., Корогодська А. М., Шабанова Г. М., Логвінков С.М., Ворожбян Р.М. Характеристика субсолідусної будови системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*: зб. наук. пр. Харків: НТУ "ХПІ". – Харків: НТН «ХПІ», 2024. - № 2(12)'2024.- С. 40-44. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2024.02.07>
4. Бережний А.С. *Багатокомпонентні системи окислів*. Київ: Наукова думка, 1970. 541с
5. Epstein L.F., Howland W.H. Binary mixture of UO_2 on other oxides. *J. Amer. Ceram. Soc.* 1953. Vol. 36, No 10. P. 334-335.
6. Горощенко Я.Г. Массцентрический метод изображения многокомпонентных систем. Киев: Наукова думка, 1982. 263 с.
7. Babushkin V.I., Matveyev G.M., Mchedlov-Petrosyan O.P. *Thermodynamics of Silicates*. Heidelberg: Springer Berlin, 2011. 459 p.
8. Логвинков С. М. Твердофазные реакции обмена в технологии керамики: монография. Харьков: ХНЭУ, 2013. 248 с.
9. Klemme S., Miltenburg J.C. The heat capacities and thermodynamic properties of NiAl_2O_4 and CoAl_2O_4 measured by adiabatic calorimetry from T = (4 to 400) K. // *Journal of Chemical Thermodynamics*. 2009, Vol. 41, P. 842-848/
10. Kuznetsov, V. & Materials Science International Team (MSIT®, ed. Effenberg, G.) (1993) Al-Ni-O Ternary Phase Diagram Evaluation. Phase diagrams, crystallographic and thermodynamic data: Datasheet from MSI Eureka in Springer Materials, https://materials.springer.com/msi/docs/sm_msi_r_10_01_4303_01
11. Zaharko O., Christensen N. B., Cervellino A., Tsurkan V., Maljuk A., Stuhr U., Niedermayer C., Yokaichiya F. Spin liquid in a single crystal of the frustrated diamond lattice antiferromagnet CoAl_2O_4 . *Physical Review B*. 2011. Vol. 84. Iss.9. P. 094403
12. Shackelford J.F., Doremus R.H. *Ceramic and Glass Materials. Structure, Properties and Processing*.

New York (NY, USA): Springer Science+Business Media, 2008. 201 p.

References (transliterated)

1. Logvinkov S.M., Shabanova G.N., Korohodska A.N., Khrystych O.V. Modified Alumina Cement with High Service Properties. *China's Refractories*. 2016. Vol. 25, No. 4. P. 1-5. <http://www.cnref.cn/EN/Y2016/V25/I4/1>
2. Khrystych O.V., Shabanova G. N., Korogodska A. N., Logvinkov S.M, Mykhailova E.A. Physico-chemical basics of creating alumina cements based on nickel and cobalt spinel. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2024. No. 5. P. 262–271. <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2024-156-5-85-90>
3. Khrystych O.V., Korohodska A.M., Shabanova H.M., Lohvinkov S.M., Vorozhbiian R.M. Kharakterystyka subsolidusnoi budovy systemy CaO - Al₂O₃ – CoO – NiO. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2024. № 2(12). S. 40-44. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2024.02.07>
4. Berezhnoy A.S. *Mnogokomponentnye sistemy okislov* [Multicomponent oxide systems]. Kiev: Naukova Dumka [Scientific thought], 1970. 544 p.
5. Epstein L.F., Howland W.H. Binary mixture of UO₂ on other oxides. *J. Amer. Ceram. Soc.* 1953. Vol. 36, No 10. P. 334-335.
6. Goroshchenko Ya.G. *Masstsentricheskii metod izobrazheniya mnogokomponentnykh system* [Mass-centric method of imaging multicomponent systems]. Kiev: Naukova Dumka [Scientific thought], 1982. 263 p.
7. Babushkin V.I., Matveyev G.M., Mchedlov-Petrosyan O.P. *Thermodynamics of Silicates*. Heidelberg: Springer Berlin, 2011. – 459 p.
8. Logvinkov S.M. *Tverdofaznyye reaktsii obmena v tekhnologii keramiki* [Solid state exchange reactions in ceramics technology]. Kharkov, KhNEU Publ., 2013., 250 p.
9. Klemme S., Miltenburg J.C. The heat capacities and thermodynamic properties of NiAlO₄ and CoAlO₄ measured by adiabatic calorimetry from T = (4 to 400) K. // *Journal of Chemical Thermodynamics*. 2009, Vol. 41, P. 842-848/
10. Kuznetsov, V. & Materials Science International Team (MSIT®, ed. Effenberg, G.) (1993) Al-Ni-O Ternary Phase Diagram Evaluation. Phase diagrams, crystallographic and thermodynamic data: Datasheet from MSI Eureka in Springer Materials, https://materials.springer.com/msi/docs/sm_msi_r_10_01_4303_01
11. Zaharko O., Christensen N. B., Cervellino A., Tsurkan V., Maljuk A., Stühr U., Niedermayer C., Yokaichiya F. Spin liquid in a single crystal of the frustrated diamond lattice antiferromagnet CoAl₂O₄. *Physical Review B*. 2011. Vol. 84. Iss.9. P. 094403
12. Shackelford J.F., Doremus R.H. *Ceramic and Glass Materials. Structure, Properties and Processing*. New York (NY, USA): Springer Science+Business Media, 2008. 201 p.

Відомості про авторів / About the Authors

Христич Олена Валеріївна (Khrystych Olena) – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри загальної та неорганічної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; Тел.: +38(095)577-24-50; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2190-1492>; e-mail: el-green@ukr.net

Корогодська Алла Миколаївна (Korohodska Alla) – доктор технічних наук, завідувач кафедри загальної та неорганічної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1534-2180>; E-mail: Alla.Korohodska@khi.edu.ua

Шабанова Галина Миколаївна (Shabanova Halyna) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7204-940X>; e-mail: gala-shabanova@ukr.net

Гапонова Олена Олександрівна (Gaponova Olena) – кандидат технічних наук, доцент кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9959-355X>; e-mail: gaponova.czn@gmail.com

Христич Михайло Олександрович (Khrystych Mykhailo) – аспірант кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-3132-8014>; e-mail: Mykhailo.Khrystych@ihti.khpi.edu.ua