

О. В. ХРИСТИЧ, А. М. КОРОГОДСЬКА, Г. М. ШАБАНОВА, С. М. ЛОГВИНКОВ, Р. М. ВОРОЖБИЯН

ХАРАКТЕРИСТИКА СУБСОЛІДУСНОЇ БУДОВИ СИСТЕМИ $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$

У роботі наведено результати розрахунків, що характеризують елементи субсолідусної будови системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$, перспективною для отримання модифікованих глиноземистих цементів та гетерофазних матеріалів з комплексом унікальних властивостей. Недостатньо відомостей про будову чотирикомпонентної діаграми стану визначеної багатокомпонентної системи, ускладнює одержання таких матеріалів. Для прогнозування фазового складу матеріалів проведено теоретичні дослідження будови системи. Виконано аналіз особливостей співіснування гетерофазних комбінацій з урахуванням геометропологічних та статистичних характеристик. Визначено технологічні ризики прогнозування фазового складу матеріалів, що виникають у певних концентраційних областях досліджуваної системи. Розрахунки проводилися у всьому температурному інтервалі, як до температури плавлення трійного оксидного з'єднання $\text{Ca}_3\text{CoAl}_4\text{O}_{10}$ при 1439 K, так і більш високотемпературної області. За відомими методиками розраховані характеристики евтектик у деяких перерізах досліджуваної системи, що становить інтерес для технологічного проектування матеріалів. Результати розрахунків характеристик евтектик показують, що серед аналізованих тетраедрів мінімальна температура евтектики (1367 K) відзначається між оксидами кобальту, нікелю, кальційкобальтовим алюмінатом та моноалюмінатом кальцію, що може бути реалізовано для синтезу гетерофазних матеріалів з високим вмістом $\text{Ca}_3\text{CoAl}_4\text{O}_{10}$. Такі матеріали мають практичне застосування в різних галузях промисловості: виробництво вапна; вапняних в'язучих; корундових абразивних матеріалах та вогнетривах; високотемпературних каталізаторах; кераміки з особливими електромагнітними властивостями.

Ключові слова: субсолідусна будова, багатокомпонентна система, довжина конод, обсяг елементарного тетраедра, ступінь асиметрії, ймовірність існування, розрахунок евтектик.

O. V. KHRISTYCH, A. M. KOROHODSKA, H. M. SHABANOVA, S. M. LOGVINKOV, R. M. VOROZHBIYAN

CHARACTERIZATION SUBSOLIDUS SYSTEM STRUCTURE $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$

The paper presents the results of calculations characterizing the elements of the subsolidus structure of the $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$ system, which is promising for the production of modified aluminous cements and heterophase materials with a complex of unique properties. Insufficient information about the structure of the four-component phase diagram of a certain multicomponent system makes it difficult to obtain such materials. To predict the phase composition of materials, theoretical studies of the structure of the system were carried out. An analysis of the features of the coexistence of heterophase combinations was carried out, taking into account geometric-topological and statistical characteristics. The technological risks of predicting the phase composition of materials that arise in certain concentration regions of the system under study are shown. Calculations were carried out over the entire temperature range, both up to the melting point of the ternary oxide compound $\text{Ca}_3\text{CoAl}_4\text{O}_{10}$ at 1439 K, and in a higher temperature region. Using known methods, the characteristics of eutectics in some sections of the system under study, which is of interest for the technological design of materials, were calculated. The results of calculations of the characteristics of eutectics show that among the analyzed tetrahedra, the minimum eutectic temperature (1367 K) is observed between the oxides of cobalt, nickel, calcium-cobalt aluminate and calcium monoaluminate, which can be realized for the synthesis of heterophase materials with a high content of $\text{Ca}_3\text{CoAl}_4\text{O}_{10}$. Such materials have practical application in various industries: lime production; lime binders; corundum abrasives and refractories; high temperature catalysts; ceramics with special electromagnetic properties.

Keywords: subsolidus structure, a multi-component system, the length of tie lines, the volume of an elementary tetrahedron, the degree of asymmetry, calculation of eutectic.

Вступ. Останніми роками в різних галузях промисловості, в яких використовуються високотемпературні агрегати, спостерігається тенденція зростання обсягів випуску та застосування вогнетривких цементів з використанням відходів, що забезпечує значну економію сировинних, енергетичних ресурсів. Головною перевагою глиноземистих цементів є використання їх у різних галузях виробництва: металургійній, хімічній, нафтопереробній тощо. Глиноземистий цемент є найбільш вивченим та дослідженим з розряду вогнетривких в'язучих, але він має ряд недоліків, уникнути яких можна шляхом прогнозування та варіації фазового складу цементу. Перспективним є створення нових ефективних вогнетривких матеріалів на основі глиноземистих цементів, отриманих з використанням відходів хімічних підприємств, які можуть замінити оксид кальцію на інші оксиди лужноземельних елементів з більш високою температурою плавлення, що дозволить надати одержуваним в'язучим матеріалам інші унікальні властивості [1-4]. Доцільно в цьому аспекті

розглянути систему $\text{CaO} - \text{CoO} - \text{NiO} - \text{Al}_2\text{O}_3$, яка важлива не тільки для поліпшення експлуатаційних характеристик широкого асортименту виробів з матеріалів, що випускаються на основі сполук цієї системи, але й перспективна для отримання модифікованих глиноземистих цементів та функціональних матеріалів[5,6].

Субсолідусна будова багатокомпонентних систем складає фізико-хімічну основу управління взаємозв'язком «склад – структура – властивості» при отриманні тугоплавких неметалевих матеріалів, що належать цим системам. Підвищений інтерес до сполук системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$ обумовлений освоєнням нових процесів дисперсного зміцнення та розкислення спеціальних сплавів, що включають кобальт та нікель [7,8]. Відповідно, зростає роль фундаментальних відомостей та детальних характеристик субсолідусної будови системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$, що визначають термодинамічно рівноважні комбінації між усіма сполуками. Недостатність відомостей про субсолідусну будову діаграми стану визначеної багатокомпонентної

системи ускладнює одержання таких матеріалів, тому метою роботи став розрахунок характеристик структурних елементів субсолідусної будови та їх аналіз по відношенню до технологічно значущих стадій синтезу матеріалів.

Мета роботи.

Метою роботи є розрахунок характеристик елементів субсолідусної будови, аналіз їх по відношенню до технологічно значущих стадій синтезу матеріалів на основі досліджуваної системи, а також розрахунок характеристичних даних евтектик в деяких елементарних тетрадрах системи, важливих для прогнозування режимів випалу тугоплавких неметалічних матеріалів.

Теоретичні положення та методи досліджень.

Результати досліджень [9, 10] складають повний набір елементів субсолідусної будови системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$ і були прийняті як вихідні для визначення їх характеристик. Розрахунок геометро-топологічних та статистичних характеристик виконували за методиками [11], а для визначення температур та складів евтектик в елементарних тетрадрах, що включають потрібну сполуку $\text{Ca}_3\text{CoAl}_4\text{O}_{10}$ – використовували метод розв'язання системи

нелінійних рівнянь для перетину поверхонь ліквідусу [12, 13].

Результати розрахунків та їх обговорення.

Довжини конод розраховані для низько- та високотемпературної тетрадрації досліджуваної системи [9] і зведені в табл. 1.

Максимальну довжину має конода $\text{NiO} - \text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$, яка представлена у субсолідусній будові досліджуваної системи у всьому температурному інтервалі. У субсолідусній ділянці до 1439 К мінімальну довжину має конода між гексаалюмінатом кальцію та кальцій-кобальтовим алюмінатом, а вище 1439 К – коноду $\text{CoAl}_2\text{O}_4 - \text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$, яка перевищує вищезгадану майже в 2,5 рази (табл. 1). Ці особливості відображаються відповідним чином на обсягах та ступені асиметрії елементарних тетрадрів, представлених в табл. 2.

На всій температурній ділянці субсолідусної будови максимальний об'єм та відносно незначну асиметрію має елементарний тетрадр № 8 (табл. 2). Ця обставина передбачає досить прості технологічні заходи щодо дозування та змішування вихідних інгредієнтів при отриманні матеріалів з фазовим складом, що відповідає цьому елементарному тетрадру.

Таблиця 1 - Довжини конод у системі $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$

№	Конода	L, від. од.	
		до 1439 К	вище 1439 К
1	$\text{CoO}-\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	0,8743	0,8743
2	$\text{CoO}-\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$	0,8661	0,8661
3	$\text{CoO}-\text{Ca}_3\text{CoAl}_4\text{O}_{10}$	0,7202	-
4	$\text{CoO}-\text{CaAl}_2\text{O}_4$	0,8789	0,8789
5	$\text{Ca}_3\text{CoAl}_4\text{O}_{10}-\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$	0,1513	-
6	$\text{Ca}_3\text{CoAl}_4\text{O}_{10}-\text{CaAl}_2\text{O}_4$	0,1808	-
7	$\text{Ca}_3\text{CoAl}_4\text{O}_{10}-\text{NiO}$	0,8300	-
8	$\text{CoO}-\text{NiAl}_2\text{O}_4$	0,8695	-
9	$\text{CoAl}_2\text{O}_4-\text{NiAl}_2\text{O}_4$	0,4232	0,4232
10	$\text{CaAl}_2\text{O}_4-\text{CoAl}_2\text{O}_4$	0,3897	-
11	$\text{CoAl}_2\text{O}_4-\text{CaAl}_4\text{O}_7$	0,3639	-
12	$\text{CoAl}_2\text{O}_4-\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$	0,3863	0,3863
13	$\text{NiAl}_2\text{O}_4-\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$	0,3890	0,3890
14	$\text{NiAl}_2\text{O}_4-\text{CaAl}_4\text{O}_7$	0,4268	0,4268
15	$\text{NiAl}_2\text{O}_4-\text{CaAl}_2\text{O}_4$	0,4238	0,4238
16	$\text{NiO}-\text{CaAl}_2\text{O}_4$	0,8789	0,8789
17	$\text{NiO}-\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$	0,9171	0,9171
18	$\text{NiO}-\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	0,9114	0,9114
19	$\text{CoO}-\text{CaAl}_4\text{O}_7$	-	0,9102

Таблиця 2 – Об'єми елементарних тетрадрів системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CoO} - \text{NiO}$

№	Елементарний тетрадр	Об'єм, %	Ступінь асиметрії
			L_{\max}/L_{\min}
Вище 1439 К			
1	$\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}-\text{CoAl}_2\text{O}_4-\text{NiAl}_2\text{O}_4$	0,0143	5,29
2	$\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}-\text{CoO}-\text{CoAl}_2\text{O}_4-\text{NiAl}_2\text{O}_4$	0,0195	2,47
3	$\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}-\text{CaAl}_4\text{O}_7-\text{CoO}-\text{NiAl}_2\text{O}_4$	0,0592	6,50
4	$\text{CaAl}_4\text{O}_7-\text{CaAl}_2\text{O}_4-\text{CoO}-\text{NiAl}_2\text{O}_4$	0,0550	7,46
5	$\text{CaAl}_2\text{O}_4-\text{CoO}-\text{NiO}-\text{NiAl}_2\text{O}_4$	0,2020	2,36

6	CaAl ₂ O ₄ -Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃ -CoO-NiO	0,1400	7,14
7	Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃ -Ca ₃ Al ₂ O ₆ -CoO-NiO	0,1300	7,69
8	Ca ₃ Al ₂ O ₆ -CaO-CoO-NiO	0,3800	2,63
	Сума	1,0000	-
	Max	0,3800	7,69
	Min	0,0143	2,36
Нижче 1439 К			
1	Al ₂ O ₃ -CaAl ₁₂ O ₁₉ -CoAl ₂ O ₄ -NiAl ₂ O ₄	0,0143	5,29
2	CaAl ₁₂ O ₁₉ -CoAl ₂ O ₄ -NiAl ₂ O ₄ -CaAl ₄ O ₇	0,0251	3,05
3	CoAl ₂ O ₄ -NiAl ₂ O ₄ -CaAl ₄ O ₇ -CaAl ₂ O ₄	0,0233	3,28
4	CoAl ₂ O ₄ -NiAl ₂ O ₄ -CaAl ₂ O ₄ -CoO	0,0853	2,08
5	NiAl ₂ O ₄ -CaAl ₂ O ₄ -CoO-NiO	0,2020	2,34
6	CaAl ₂ O ₄ -CoO-NiO-Ca ₃ CoAl ₄ O ₁₀	0,0850	5,53
7	CoO-NiO-Ca ₃ CoAl ₄ O ₁₀ -Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃	0,0316	6,61
8	NiO-Ca ₃ CoAl ₄ O ₁₀ -Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃ -CaAl ₂ O ₄	0,0235	6,28
9	CoO-Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃ -NiO-Ca ₃ Al ₂ O ₆	0,1300	1,06
10	CoO-Ca ₃ Al ₂ O ₆ -NiO-CaO	0,3800	1,14
	Сума	1,0000	-
	Max	0,3800	6,61
	Min	0,0143	1,06

Мінімальний об'єм має елементарний тетраedr № 1 (табл.1), що має значну асиметрію і передбачає високу точність дозування і значний час змішування інгредієнтів матеріалів, що синтезуються. Не менш важливим є додатковий контроль зазначених технологічних операцій для зниження ризику вийти за межі об'ємів елементарних тетраедрів з високим ступенем асиметрії (вище 1439 К: № 3, 4 і 6, 7; нижче

1439 К: № 6 – 8) та синтезувати нецільові сполуки у фазовому складі матеріалів.

Геометро-топологічні характеристики елементів субсолідусної будови дозволяють оцінити відносну термодинамічну стабільність сполук системи та ймовірність появи фаз при дії випадкових факторів, результати розрахунків представлені в табл. 3.

Таблиця 3 – Геометро-топологічна характеристика фаз системи CaO - Al₂O₃ – CoO – NiO

№	Сполука	У скількох тетраедрах існує	Зі скількома фазами співіснує	Сумарна площа існування, S, відн. од.	Імовірність існування, ω, відн. од.
Вище 1439 К					
1	CaO	1	2	0,3800	0,0950
2	CoO	7	8	0,9857	0,2464
3	Al ₂ O ₃	1	2	0,0143	0,0036
4	NiO	4	5	0,8520	0,2130
5	CoAl ₂ O ₄	2	3	0,0338	0,0084
6	NiAl ₂ O ₄	5	6	0,3500	0,0875
7	CaAl ₂ O ₄	3	4	0,3970	0,0992
8	CaAl ₄ O ₇	2	3	0,1142	0,0285
9	CaAl ₁₂ O ₁₉	3	4	0,0930	0,0232
10	Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃	2	3	0,2700	0,0675
11	Ca ₃ Al ₂ O ₆	2	3	0,5100	0,1275
	Сума			4,000	1,000
	Max			0,9857	0,2464
	Min			0,0143	0,036
Нижче 1439 К					
1	CaO	1	2	0,3800	0,0950
2	CoO	7	8	0,9139	0,2285
3	Al ₂ O ₃	1	2	0,0143	0,0036
4	NiO	6	7	0,8521	0,2130
5	CoAl ₂ O ₄	4	5	0,1480	0,0370
6	NiAl ₂ O ₄	5	6	0,3500	0,0875

7	CaAl ₂ O ₄	5	6	0,4191	0,1048
8	CaAl ₄ O ₇	2	3	0,0483	0,0121
9	CaAl ₁₂ O ₁₉	2	3	0,0394	0,0098
10	Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃	2	3	0,1851	0,0463
11	Ca ₃ Al ₂ O ₆	2	3	0,5100	0,1275
12	Ca ₃ CoAl ₄ O ₁₀	3	4	0,1401	0,0350
	Сума			4,000	1,000
	Max			0,9139	0,2285
	Min			0,0143	0,0036

Максимальна ймовірність існування відзначається у оксиду кобальту, який співіснує з усіма сполуками субсолідусної області досліджуваної системи. Відповідно, оксид кобальту CoO може вважатися найбільш термодинамічно стійким серед будь-яких фазових композицій, і може часто ідентифікуватися в матеріалах системи CaO - Al₂O₃ - CoO - NiO, як акцесорна фаза, що утворилася в локальних місцях матеріалу через вплив на технологію випадкових факторів. Корунд у подібних ситуаціях найменш можливо ідентифікувати, тому що, у всьому температурному інтервалі субсолідусної будови, він є лише в одному елементарному тетраедрі з малим об'ємом та має мінімальну ймовірність існування. Ймовірність існування Al₂O₃ у фазових композиціях досліджуваної системи на порядок менша, ніж у потрійної оксидної сполуки Ca₃CoAl₄O₁₀, а порівняно з CoO ще менша: у 63 та 68 разів у низько- та високотемпературній субсолідусній будові (табл. 3).

Наявність у складах цементних композицій чистих оксидів є небажаним, оскільки можливим є їх подальше перетворення у процесах служби, тому з технологічної точки зору розгляд тетраедрів, які містять дані фази є недоцільним. Серед тетраедрів, які містять технологічно значущі фази, найбільший об'єм мають CaAl₁₂O₁₉ - CoAl₂O₄ - NiAl₂O₄ - CaAl₄O₇ та CoAl₂O₄ - NiAl₂O₄ - CaAl₄O₇ - CaAl₂O₄, що зумовлює розробку спеціальних в'язучих матеріалів саме на основі сполук обраних тетраедрів.

Також відзначимо, що кальцій-кобальтовий алюмінат має дуже значну ймовірність існування, тому що він присутній у трьох елементарних тетраедрах з малим сумарним об'ємом. Вважається доцільним оцінити температуру можливої появи розплаву через утворення евтектик у цих елементарних тетраедрах. Розраховані значення температур та складу евтектик представлені в табл. 4.

Таблиця 4 - Характеристики евтектичних точок у системі CaO - Al₂O₃ - CoO - NiO.

№	Переріз	T _{евт} , К	Склад евтектики, мол.%			
			X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
1	CoO-NiO-Ca ₃ CoAl ₄ O ₁₀ -CaAl ₂ O ₄	1367	38,49	42,33	11,74	7,43
2	CoO-NiO-Ca ₃ CoAl ₄ O ₁₀ -Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃	1387	40,17	44,12	15,71	-
3	NiO-Ca ₃ CoAl ₄ O ₁₀ -Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃ - CaAl ₂ O ₄	1450	49,86	37,22	0,03	12,88

Результати розрахунків характеристик евтектик (табл. 4) показують, що серед аналізованих тетраедрів мінімальна температура евтектики (1367 К) відзначається між оксидами кобальту, нікелю, кальцій-кобальтовим алюмінатом та моноалюмінатом кальцію. Температура цієї евтектики лише на 163 К нижче за температуру розкладання Ca₃CoAl₄O₁₀ і можна прогнозувати вузький інтервал спікання матеріалів у цій області. У складі цієї евтектики в максимальній кількості міститься CoO, мінімальний - CaAl₂O₄. В елементарному тетраедрі № 3 (табл. 4) інтервал спікання ще вужчий, таким чином, температура появи евтектичного розплаву та температура розкладання Ca₃CoAl₄O₁₀ відрізняються лише на 80 К. Крім того, у складі евтектики невеликий вміст (всього 0,03 мол.%) кальцій-кобальтового алюмінату і ця особливість може бути

реалізована для синтезу гетерофазних матеріалів з високим вмістом Ca₃CoAl₄O₁₀.

Висновки. Таким чином, проведений аналіз та виконаний комплекс досліджень субсолідусної будови системи CaO - Al₂O₃ - CoO - NiO надає технологам важливі фундаментальні відомості про фазові рівноваги, що дозволяють прогнозувати різні термодинамічно стабільні комбінації сполук, керувати процесами синтезу та формувати заданий комплекс властивостей у матеріалах зазначеної системи. На підставі отриманих результатів розглянута можливість синтезу матеріалів, які мають практичне застосування в різних галузях промисловості: виробництво вапна; вапняних в'язучих; корундових абразивних матеріалів та вогнетривих; високотемпературних каталізаторів; кераміки з особливими електромагнітними властивостями. Отримані результати досліджень можуть використовуватися для вирішення низки

екологічних проблем при створенні функціональних матеріалів за ресурсозберігаючої технологією.

Список літератури

1. Kurdowski W. *Cement and Concrete Chemistry*. Heidelberg (DE): Springer Publ., 2014. 700 p.
2. Older I. *Special Inorganic Cements* / I. Older. London: E & FN Spon, 2000. 376 p.
3. Vert T., Smith J. D. *Refractory Material Selection for Steelmaking*. Wiley & Sons, 2016. 390 p.
4. Ropp R. C. *Encyclopedia of the Alkaline Earth Compounds*. Amsterdam: Elsevier, 2013. 1187 p.
5. 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.
6. Kashcheev I. D., Zemlyanoi K. G., "Spinel Production," *Refractories and Industrial Ceramics*, 2017. Vol. 58, No 2. Pp. 162–168.
7. Логвінков С. М. *Твердофазні реакції обміну в технології кераміки*: монографія. Харків: ХНЕУ, 2013. 250 с.
8. Logvinkov S. M., Borysenko O. M., Ivashura A. A., Shabanova H. M., Shumejko V. M., Korohodska A. M., Tsapko N. S. Solid-state exchange reactions during sintering of dispersed alumina. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2024. No. 1. Pp. 48–54.
9. Khrystych O.V., Shabanova G.N., Korohodska 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. Pp. 262–271.
10. Христич О. В., Корогодська А. М., Шабанова Г. М., Логвінков С. М. До питання про співіснування нікелевої і кобальтової шпінелі. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Харків: НТУ «ХПІ», 2024. № 1(11). С. 57–62. <http://ccte.khpi.edu.ua/article/view/304574>
11. Бережний А. С. *Багатокомпонентні системи окислів*. Київ: Наукова думка, 1970. 541с.
12. Epstein L. F., Howland W. H. Benary mixture of UO₂ on other oxiden. *J. Amer. Ceram. Soc.* 1953. Vol. 36, No.10. Pp. 334-335.
13. Горощенко Я. Г. *Масцентричний метод зображення багатокомпонентних систем*. Київ: Наукова думка, 1982. 263 с.

References (transliterated)

1. Kurdowski W. *Cement and Concrete Chemistry*. Heidelberg (DE): Springer Publ., 2014. 700 p.
2. Older I. *Special Inorganic Cements* I. Older. London: E & FN Spon, 2000. 376 p.
3. Vert T., Smith J.D. *Refractory Material Selection for Steelmaking*. Wiley & Sons, 2016. 390 p.
4. Ropp R.C. *Encyclopedia of the Alkaline Earth Compounds*. Amsterdam: Elsevier, 2013. 1187 p.
5. 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.
6. Kashcheev I.D., Zemlyanoi K.G., "Spinel Production," *Refractories and Industrial Ceramics*, 2017. vol. 58, no 2. pp. 162–168.
7. Logvinkov S.M. *Tverdofaznyye reaktsii obmena v tekhnologii keramiki [Solid state exchange reactions in ceramics technology]*. Kharkov, KhNEU Publ., 2013. 250 p.
8. Logvinkov S.M., Borysenko O.M., Ivashura A.A., Shabanova H.M., Shumejko V.M., Korohodska A.M., Tsapko N.S. Solid-state exchange reactions during sintering of dispersed alumina. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2024, No. 1, pp. 48-54
9. Khrystych O.V., Shabanova G.N., Korohodska 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, pp. 262-271.
10. Khrystych O.V., Korohodska A.M., Shabanova H.M., Logvinkov S.M. Do pytannia pro spivisnuvannia nikelivoi i kobaltovoii shpineli. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2024. № 1(11). S. 57-62. <http://ccte.khpi.edu.ua/article/view/304574>
11. Berezhnoy A.S. *Mnogokomponentnye sistemy okislov [Multicomponent oxide systems]*. Kiev: Naukova Dumka [Scientific thought], 1970. 544 p.
12. Epstein L.F., Howland W.H. Benary mixture of UO₂ on other oxiden. *J. Amer. Ceram. Soc.*, 1953. Vol. 36, № 10. Pp. 334-335.
13. Horoshchenko Ya.H. *Mastsentrychnyi metod zobrazhennia bahatokomponentnykh system*. Kyiv: Naukova dumka, 1982. 263 s.

Відомості про авторів / About the Authors

Христич Олена Валеріївна (Khrystych Olena) – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри загальної та неорганічної хімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <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: <https://orcid.org/0000-0002-1534-2180>, e-mail: Alla.Korohodska@khpi.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: <https://orcid.org/0000-0001-7204-940X>, e-mail: gala-shabanova@ukr.net

Логвінков Сергій Михайлович (Logvinkov Sergii) - доктор технічних наук, професор, професор кафедри готельного і ресторанного бізнесу, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5957-2386>, e-mail: Sergii.Logvinkov@m.hneu.edu.ua

Ворожбіян Роман Михайлович (Vorozhbiian Roman) – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації технологічних систем та екологічного моніторингу, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0864-2281>, e-mail: Roman.Vorozhbiian@khpi.edu.ua