

УДК 666.7

*Канд. техн. наук О. М. Борисенко<sup>1</sup>, д-р техн. наук С. М. Логвінков<sup>2</sup>,  
д-р техн. наук Г. М. Шабанова<sup>1</sup>, д-р техн. наук А. М. Корогодська<sup>1</sup>,  
канд. техн. наук І. А. Остапенко<sup>3</sup>  
(<sup>1</sup>НТУ «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна;  
<sup>2</sup>ХНЕУ ім. С. Кузнеця, м. Харків, Україна;  
<sup>3</sup>ТОВ «Дружківський вогнетривкий завод», м. Дружківка, Україна)*

## **Розрахунки та аналіз температур та складів евтектик полікомпонентних перетинів системи MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – FeO – TiO<sub>2</sub>**

### **Вступ**

Система MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – FeO – TiO<sub>2</sub> є фізико-хімічною основою для розробки складів периклазошпінельних вогнетривів зокрема для футерівки обертових печей цементного виробництва.

Периклазошпінельні вогнетриви мають низький коефіцієнт термічного розширення виробів, високу стійкість до термомеханічних напружень, високу стійкість до корозії і змін пічної атмосфери та підвищену схильність до утворення захисного шару обмазки [1 – 3].

Футерівка обертових печей виконує низку важливих функцій [4]: вона є трансферною поверхнею, по якій рухається цементний клінкер під час випалу; також вона є поверхнею, що акумулює тепло та передає його матеріалу, що випалюється; і основна – теплоізоляція. Теплоізоляційні властивості футерівки є критерієм її зносу, тому надійність та довговічність перш за все необхідно розглядати з точки зору правильності підбору хіміко-мінерального складу вогнетриву [5].

Оскільки периклазошпінельні вогнетриви, отримані на основі системи MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – FeO – TiO<sub>2</sub>, експлуатують в умовах підвищених температур, в роботі проведено розрахунки та аналіз температур та складів евтектик бінарних, потрійних та четверних перетинів системи з метою прогнозування появи розплаву у відповідних матеріалах та розробки технологічних рішень щодо раціональної кількості розплаву під час спікання і в якості затравки для набору обмазки.

### **Теоретична частина**

Відповідно до раніше проведених досліджень [6 – 9] субсолідусна будова системи MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – FeO – TiO<sub>2</sub> є складною та змінюється у шести температурних інтервалах: I – до 1141 К та II – 1141 – 1413 К, що пояснюється перебудовою коннод у системах MgO – TiO<sub>2</sub> – FeO та MgO – FeO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; III – 1413 – 1537 К – вище температури 1413 К стабільний псевдобрукіт, а такою для спрощення розрахунків фазовий перехід анатаз – рутіл приймаємо ~ 1413 К; IV – 1537 – 1630 К – тіаліт стабільний вище 1537 К; V – 1630 – 2076 К – в системі Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – FeO – TiO<sub>2</sub> відбувається перебудова коннод, VI – вище 2076 К – з огляду на те, що

існування сполуки  $Al_4TiO_8$  не доведене, дослідження системи вище даної температури мають рекомендаційний характер і вимагають наступних теоретичних і практичних досліджень.

Вище температури 1141 К незмінними залишаються елементарні тетраедри [9]:  $MgO - FeO - Mg_2TiO_4 - MgAl_2O_4$ ,  $FeAl_2O_4 - Mg_2TiO_4 - FeO - Fe_2TiO_4$ ,  $FeAl_2O_4 - Mg_2TiO_4 - MgAl_2O_4 - FeO$  та  $FeAl_2O_4 - MgTiO_3 - MgAl_2O_4 - Al_2O_3$ , до складу яких входять шпінельні фази. Поєднання різних видів шпінелей у складі вогнетриву дає можливість створити матеріали з високими експлуатаційними характеристиками [10, 11].

Для побудови поверхонь ліквідусу полікомпонентних перетинів використовували програму для розрахунків температур евтектик в багатоконпонентних системах Eutektika 1.3.3 [12].

У табл. 1 наведено вихідні дані для розрахунків температур і складів евтектик.

*Таблиця 1*

Вихідні дані для розрахунку температур і складів евтектик полікомпонентних перетинів системи  $MgO - Al_2O_3 - FeO - TiO_2$

Сполука	Кількість атомів у сполуці, N	Температура плавлення, К
MgO	2	3098 [13]
$Al_2O_3$	5	2316 [13]
FeO	2	1648 [13]
$MgAl_2O_4$ (алюмомагnezіальна шпінель)	7	2378 [13]
$FeAl_2O_4$ (герциніт)	7	2053 [13]
$Fe_2TiO_4$ (ульвошпінель)	6	1933 [13]
$MgTiO_3$ (гейкеліт)	5	1903 [13]
$Mg_2TiO_4$ (кванділіт)	7	2005 [13]

Характеристики евтектик чотирикомпонентних перетинів  $MgO - FeO - Mg_2TiO_4 - MgAl_2O_4$ ,  $FeAl_2O_4 - Mg_2TiO_4 - FeO - Fe_2TiO_4$ ,  $FeAl_2O_4 - Mg_2TiO_4 - MgAl_2O_4 - FeO$  та  $FeAl_2O_4 - MgTiO_3 - MgAl_2O_4 - Al_2O_3$  системи  $MgO - Al_2O_3 - FeO - TiO_2$  наведено в табл. 2 – 5.

Таблиця 2

Розрахункові характеристики евтектик перетину  $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$ 

№	Евтектика	Температура евтектики, К	Склад евтектик, мол. %			
			X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
1	$\text{MgO} - \text{FeO}$	1539	13,20	86,80	–	–
2	$\text{MgO} - \text{Mg}_2\text{TiO}_4$	1912	28,90	71,10	–	–
3	$\text{MgO} - \text{MgAl}_2\text{O}_4$	2196	44,00	56,00	–	–
4	$\text{FeO} - \text{Mg}_2\text{TiO}_4$	1546	87,50	12,50	–	–
5	$\text{FeO} - \text{MgAl}_2\text{O}_4$	1618	96,30	3,70	–	–
6	$\text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$	1941	79,30	20,70	–	–
7	$\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Mg}_2\text{TiO}_4$	1484	11,35	80,12	8,53	–
8	$\text{MgO} - \text{FeO} - \text{MgAl}_2\text{O}_4$	1526	12,75	85,24	2,01	–
9	$\text{FeO} - \text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$	1534	86,21	11,67	2,12	–
10	$\text{MgO} - \text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$	1864	26,60	58,88	14,51	–
11	$\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$	1477	11,12	79,30	8,18	1,40

Таблиця 3

Розрахункові характеристики евтектик перетину  $\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{FeO} - \text{Fe}_2\text{TiO}_4$ 

№	Евтектика	Температура евтектики, К	Склад евтектик, мол. %			
			X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
1	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{Mg}_2\text{TiO}_4$	1845	45,50	54,50	–	–
2	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{FeO}$	1559	10,81	89,19	–	–
3	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{Fe}_2\text{TiO}_4$	1796	36,80	63,20	–	–
4	$\text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{FeO}$	1546	12,50	87,50	–	–
5	$\text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{Fe}_2\text{TiO}_4$	1778	40,80	59,20	–	–
6	$\text{FeO} - \text{Fe}_2\text{TiO}_4$	1501	82,20	17,80	–	–
7	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{FeO}$	1504	7,76	9,70	82,54	–
8	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{Fe}_2\text{TiO}_4$	1710	24,51	29,83	45,66	–
9	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{FeO} - \text{Fe}_2\text{TiO}_4$	1471	6,26	78,58	15,16	–
10	$\text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{FeO} - \text{Fe}_2\text{TiO}_4$	1464	7,54	77,81	14,65	–
11	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{FeO} - \text{Fe}_2\text{TiO}_4$	1443	5,18	6,54	75,25	13,03

Таблиця 4

Розрахункові характеристики евтектик перетину  $\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{FeO}$ 

№	Евтектика	Температура евтектики, К	Склад евтектик, мол. %			
			X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
1	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{Mg}_2\text{TiO}_4$	1845	45,50	54,50	–	–
2	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$	1976	76,00	24,00	–	–
3	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{FeO}$	1559	10,81	89,19	–	–
4	$\text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$	1941	79,30	20,70	–	–
5	$\text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{FeO}$	1546	12,50	87,50	–	–
6	$\text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{FeO}$	1618	3,70	96,30	–	–
7	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$	1816	40,18	48,34	11,48	–
8	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{FeO}$	1504	7,76	9,70	82,54	–
9	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{FeO}$	1546	10,06	2,31	87,62	–
10	$\text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{FeO}$	1534	11,67	2,13	86,20	–
11	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{Mg}_2\text{TiO}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{FeO}$	1497	7,41	9,28	1,62	81,69

Таблиця 5

Розрахункові характеристики евтектик перетину  $\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{MgTiO}_3 - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 

№	Евтектика	Температура евтектики, К	Склад евтектик, мол. %			
			X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
1	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{MgTiO}_3$	1766	32,10	67,90	–	–
2	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$	1976	76,00	24,00	–	–
3	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$	1928	63,50	36,50	–	–
4	$\text{MgTiO}_3 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$	1849	86,50	13,50	–	–
5	$\text{MgTiO}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$	1804	75,90	24,10	–	–
6	$\text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$	2102	39,90	60,10	–	–
7	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{MgTiO}_3 - \text{MgAl}_2\text{O}_4$	1744	28,87	63,30	7,83	–
8	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{MgTiO}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$	1714	25,07	57,65	17,28	–
9	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$	1881	52,76	15,74	31,50	–
10	$\text{MgTiO}_3 - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$	1773	21,60	69,24	9,16	–
11	$\text{FeAl}_2\text{O}_4 - \text{MgTiO}_3 - \text{MgAl}_2\text{O}_4 - \text{Al}_2\text{O}_3$	1698	23,12	54,64	6,05	16,19

## Результати та їх обговорення

Аналіз отриманих результатів показує, що найвищі температури евтектик спостерігаються у перетинах, до складу яких входять одна або більше шпінельних фаз. Поєднання різних типів шпінелей у фазовому складі матеріалу сприяє більш інтенсивному утворенню рівномірної павутинної мікропористої структури у процесі випалу за рахунок різного термічного розширення цих шпінелей. Таку мікроструктуру часто називають термопластичною, тому що вона ефективно гасить ріст тріщин під час різких перепадів температур та забезпечує високу термостійкість матеріалу. Крім того, периклазошпінельні матеріали тільки з  $MgAl_2O_4$  не змочуються розплавом портландцементного клінкеру, а наявність у фазовому складі вогнетриву сполук Fe (II) забезпечує умови набору гарнісажної обмазки.

У перетинах, до складу яких входить FeO (табл. 2 – 4), необхідно ретельно слідкувати за його вмістом. Вільний FeO окиснюється до  $Fe_2O_3$  зі значним збільшенням об'єму, що сприяє руйнуванню цілісності вогнетриву. Спільна присутність MgO і FeO дозволяє формувати неперервний ряд твердих розчинів – магнезівюститів [13], що визначає умовність евтектик (табл. 2).

У перетину  $FeAl_2O_4 - MgTiO_3 - MgAl_2O_4 - Al_2O_3$  найбільша температура евтектики (табл. 5) серед чотирикомпонентних перетинів системи  $MgO - Al_2O_3 - FeO - TiO_2$ . У цьому перетині, як і у  $FeAl_2O_4 - Mg_2TiO_4 - MgAl_2O_4 - FeO$ , найбільшу температуру має евтектика, розташована на ребрі  $FeAl_2O_4 - MgAl_2O_4$  (алюмагнезіальна шпінель – герциніт). Тобто, для отримання матеріалу з високими експлуатаційними властивостями необхідно коригувати фазовий склад вогнетриву в сторону збільшення  $FeAl_2O_4$  та  $MgAl_2O_4$ , але значне збільшення вмісту алюмагнезіальної шпінелі та герциніту може призвести до руйнування структури вогнетриву, що пов'язано зі значним збільшенням об'єму в результаті різноманітних перетворень, які відбуваються у процесі експлуатації матеріалу [14]. Усі перетини, до складу яких входять шпінельні фази:  $Mg_2TiO_4 - MgAl_2O_4$  (1941 K),  $FeAl_2O_4 - Mg_2TiO_4$  (1845 K),  $FeAl_2O_4 - Fe_2TiO_4$  (1796 K),  $Mg_2TiO_4 - Fe_2TiO_4$  (1778 K),  $FeAl_2O_4 - MgAl_2O_4$  (1976 K), мають відносно високі температури евтектик. Але вміст шпінельних фаз, як і FeO необхідно чітко регламентувати.

## Заключний розділ

Таким чином, проведений розрахунковий аналіз температур і складів евтектик полікомпонентних перетинів  $MgO - FeO - Mg_2TiO_4 - MgAl_2O_4$ ,  $FeAl_2O_4 - Mg_2TiO_4 - FeO - Fe_2TiO_4$ ,  $FeAl_2O_4 - Mg_2TiO_4 - MgAl_2O_4 - FeO$  та  $FeAl_2O_4 - MgTiO_3 - MgAl_2O_4 - Al_2O_3$  системи  $MgO - Al_2O_3 - FeO - TiO_2$  підтверджує можливість синтезу периклазошпінельних

вогнетривів з високими експлуатаційними характеристиками в цій системі та надає необхідну технологічну інформацію для цільового керування взаємозв'язком «склад – структура – властивості» під час їх отримання.

### Бібліографічний список

1. Guo Z., Palco S., Rigaud M. Reaction Characteristics of Magnesia-Spinel Refractories with Cement Clinker. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2005. 2(4). P. 327–335. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2005.02027.x>.
2. Zhou W., Yan W., Ma S., Schafföner S., Dai Y., Li Y. Degradation mechanisms of periclase-magnesium aluminate spinel refractory bricks used in the upper transition zone of a cement rotary kiln. *Construction and Building Materials*. 2020. 121617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121617>.
3. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топков. В 2 кн. Кн. 2. Служба огнеупоров / под. ред. И. Д. Кашеева, Е. Е. Грищенко. Москва : Интермет Инжиниринг, 2002. 656 с.
4. Кашеев И. Д. Эксплуатация огнеупоров в футеровке цементных вращающихся печей. *Новые огнеупоры*. 2015. № 9. С. 25–28.
5. Liu G., Li N., Yan W., Gao C., Zhou W., Li Y. Composition and microstructure of a periclase-composite spinel brick used in the burning zone of a cement rotary kiln. *Ceramics International*. 2014. 40(6). P. 8149–8155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.01.010>.
6. Борисенко О. М., Логвінков С. М., Шабанова Г. М., Остапенко І. А. Геометро-топологічні характеристики субсолідусної будови системи MgO – FeO – TiO<sub>2</sub>. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Т. 32 (71). № 1, Ч. 2. С. 45–49. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.1-2/08>.
7. Борисенко О. М., Логвінков С. М., Шабанова Г. М., Корогодська А. М., Івашура М. М., Івашура А. А. Субсолідусна будова системи MgO – FeO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2021. № 2 (4). С. 59–64. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.01.09>.
8. Борисенко О. М., Логвінков С. М., Шабанова Г. М., Остапенко І. А., Шумейко В. М. Геометро-топологічні характеристики субсолідусної будови системи MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – TiO<sub>2</sub>. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. 2021. № 1 (5). С. 18–23. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2021.01.03>.
9. Borisenko O., Logvinkov S., Shabanova G., Mirgorod O. Thermodynamics of Solid-Phase Exchange Reactions Limiting the Subsolidus Structure of the System MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – FeO – TiO<sub>2</sub>. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 177–184. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.177>.
10. Bahtli T., Aksel C., Kavas T. Corrosion behavior of MgO – MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> – FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> composite refractory materials. *Journal of the Australian Ceramic Society*. 2017. 53(1). P. 33–40. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41779-016-0006-6>.
11. Rodríguez E., Castillo G-A., Contreras J., Puente-Ornelasa R., Aguilar-Martínez J.A., García L., Gómez C. Hercynite and magnesium aluminate spinels acting as a ceramic bonding in an electrofused MgO – CaZrO<sub>3</sub> refractory brick for the cement industry. *Ceramics International*. 2012. 38(8). P. 6769–6775. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.05.071>.
12. Програма для расчета температуры эвтектик в многокомпонентных системах. URL: <https://chefranov.name/projects/eutektika/> (дата звернення: 25.06.2021).
13. Бережной А. С. Многокомпонентные системы окислов. Киев: Издательство «Наукова думка», 1970. 544 с.

14. Шихта для изготовления алюможелезистой шпинели и огнеупоров с использованием алюможелезистой шпинели: пат. 105389 Россия, МПК С04 В 35/043. Аксельрод Л. М., Пищик О. Н., Кисилева Е. А., Найман Д. А.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Группа «Магнезит»». № 2013159119/03; заявл. 30.12.2013; опубл. 20.02.2015, Бюл. № 5.

### References (transliterated)

1. Guo Z., Palco S., Rigaud M. Reaction Characteristics of Magnesia-Spinel Refractories with Cement Clinker. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2005, 2(4), p. 327–335. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2005.02027.x>.

2. Zhou W., Yan W., Ma S., Schafföner S., Dai Y., Li Y. Degradation mechanisms of periclase-magnesium aluminate spinel refractory bricks used in the upper transition zone of a cement rotary kiln. *Construction and Building Materials*. 2020, 121617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121617>.

3. Ogneupory dlya promyshlennykh agregatov i topok [Refractories for industrial units and furnaces]. V 2 kn. Kn. 2. *Sluzhba ogneuporov* [Service of refractories] / pod. red. I. D. Kashcheeva, E. E. Grishenkova. Moscow : Intermet Inzhiniring, 2002. 656 p. (in Russian).

4. Kashcheev I. D. Ekspluatatsiya ogneuporov v futerovke tsementnykh vrashchayushchikhsya pechey [Operation of refractories in the lining of cement rotary kilns]. *Novye ogneupory* [New refractories]. 2015, no. 9, p. 25–28. (in Russian).

5. Liu G., Li N., Yan W., Gao C., Zhou W., Li Y. Composition and microstructure of a periclase-composite spinel brick used in the burning zone of a cement rotary kiln. *Ceramics International*. 2014, 40(6), p. 8149–8155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.01.010>.

6. Borysenko O. M., Logvinkov S. M., Shabanova G. M., Ostapenko I. A. Heometro-topologichni kharakterystyky subsolidusnoyi budovy systemy MgO – FeO – TiO<sub>2</sub> [Geometrical-topological characteristics of the subsolidus structure in the MgO – FeO – TiO<sub>2</sub> system]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernads'koho. Seriya: Tekhnichni nauky* [Scientific notes of TNU named after V.I. Vernadsky. Series: Technical Sciences.]. 2021, vol. 32(71), no. 1(2), p. 45–49. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.1-2/08>. (in Ukrainian).

7. Borysenko O. M., Logvinkov S. M., Shabanova G. M., Korohodska A. M., Ivashura M. M., Ivashura A. A. Subsolidusna budova systemy MgO – FeO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [Subsolidus structure of the MgO – FeO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Seriya: Novi rishennya v suchasnykh tekhnolohiyakh* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology], 2021, no. 2(4), 59–64. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.01.09>. (in Ukrainian).

8. Borysenko O. M., Logvinkov S. M., Shabanova G. M., Ostapenko I. A., Shumejko V. M. Heometro-topologichni kharakterystyky subsolidusnoyi budovy systemy MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – TiO<sub>2</sub> [Geometrical-topological characteristics of the subsolidus structure in the MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – TiO<sub>2</sub> system]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Seriya: Khimiya, khimichna tekhnolohiya ta ekolohiya* [Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Chemistry, Chemical Technology and Ecology]. 2021, no. 1 (5), p. 18–23. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2021.01.03>. (in Ukrainian).

9. Borysenko O., Logvinkov S., Shabanova G., Mirgorod O. Thermodynamics of Solid-Phase Exchange Reactions Limiting the Subsolidus Structure of the System MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – FeO – TiO<sub>2</sub>. *Materials Science Forum*. 2021, vol. 1038, p. 177–184. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.177>.

10. Bahtli T., Aksel C., Kavas T. Corrosion behavior of MgO – MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> – FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> composite refractory materials. *Journal of the Australian Ceramic Society*. 2017, 53(1), p. 33–40. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41779-016-0006-6>.

11. Rodríguez E., Castillo G-A., Contreras J., Puente-Ornelasa R., Aguilar-Martínez J.A., García L., Gómez C. Hercynite and magnesium aluminate spinels acting as a ceramic bonding in an electrofused MgO – CaZrO<sub>3</sub> refractory brick for the cement industry. *Ceramics International*. 2012, 38(8), p. 6769–6775. DOI: <https://10.1016/j.ceramint.2012.05.071>
12. Programma dlya rascheta temperatury evtektik v mnogokomponentnykh sistemakh [Program for calculating the temperature of eutectics in multicomponent systems.]. Available from: <https://chefranov.name/projects/eutektika/>. [Accessed: 25 June 2021].
13. Berezhnoy A. S. *Mnogokomponentnyye sistemy okislov*. [Multicomponent systems of oxides]. Kiev: Izdatel'stvo "Naukova Dumka", 1970. 544 p. (in Russian).
14. Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Gruppa "Magnezit" [Limited Liability Company "Magnezit Group"]. Shikhta dlya izgotovleniya alyumozhelezistoy shpineli i ogneuporov s ispol'zovaniyem alyumozhelezistoy shpineli [Charge for manufacture of aluminum-ferrous spinel and refractory using aluminum-ferrous spinel]. Inventors: Aksel'rod L. M., Pitsik O. N., Kiseleva E. A., Najman D. A. Appl: 2013-30-12, no. 2013159119/03; publ: 2015-20-02, Bull. no. 5. IPC C04 B 35/043. Patent RF, no. 105389 (in Russian).