

Побудований топологічний граф взаємозв'язку елементарних тетраедрів і дана геометро-топологічна характеристика фаз системи; визначені області системи, придатні в технології вогнетривких матеріалів і побудована діаграма зміни фазового складу в перерізі мулітокорундової вогнетрив - металургійний шлак

Ключові слова: мулітокорундовий, геометро-топологічна, топологічний граф

Построен топологический граф взаимосвязи элементарных тетраэдров и дана геометро-топологическая характеристика фаз системы; определены области системы, пригодные в технологии огнеупорных материалов и построена диаграмма изменения фазового состава в сечении мулитокоорундовый огнеупор – металлургический шлак

Ключевые слова: мулитокоорундовый, геометро-топологическая, топологический граф

A topological graph the relationship of elementary tetrahedrons is built and a geometric-topological characteristic of phases of the system is given, areas of suitable refractory materials in technology of fire-resistant materials are given and changes in the phase diagram is constructed in a section of moltencorundum refractory - metallurgical slag

Keywords: moltencorundum, geometric-topological and topological graph

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА В СЕЧЕНИИ МУЛЛИТОКОРУНДОВЫЙ ОГНЕУПОР – МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ШЛАК

А.С. Рыщенко

Младший научный сотрудник*
Контактный тел.: 050-401-37-07
E-mail: Vash.84@mail.ru

Г.В. Лисачук

Доктор технических наук, профессор, заведующий
научно-исследовательской частью*
Контактный тел.: (057)707-62-13

Я.Н. Питак

Доктор технических наук, профессор, заместитель
заведующего кафедрой*
Контактный тел.: (057) 707-63-92

E-mail: pyarn1@rambler.ru

*Кафедра технологии керамики,
огнеупоров, стекла и эмалей

Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

1. Введение

Системы, включающие огнеупорные оксиды и соединения, с одной стороны, и композиции оксидов, входящих в состав металлургических шлаков, с другой стороны, а также оксиды железа представляют интерес для описания физико-химических процессов протекающих на контакте огнеупор – шлак при различных температурах службы. К таковым относятся системы на основе оксидов магния, кальция, кремния, алюминия, хрома, цинка, железа. Одной из таких систем, имеющих существенное прикладное значение в технологии тугоплавких неметаллических материалов, особенно при рассмотрении вопросов службы огнеупоров в металлургических агрегатах и изучении фазового состава металлургических шлаков является система $\text{CaO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ [1 – 3].

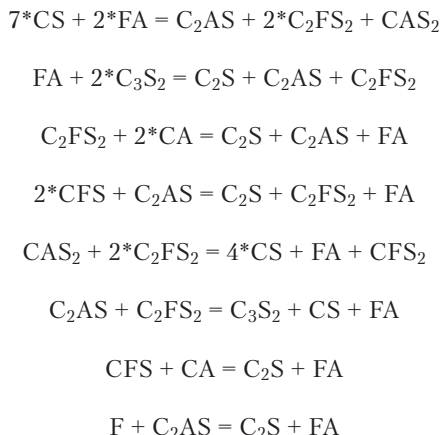
Знание строения этой системы позволит прогнозировать фазовые превращения в процессе получения

изделий и службы огнеупоров и определять оптимальные условия эксплуатации огнеупоров.

2. Экспериментальная часть

Для выявления областей составов в системе $\text{CaO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$, пригодных для технологии огнеупоров, необходимо проведение дальнейших исследований с привлечением термодинамического метода анализа для уточнения субсолидусного строения системы.

Для выявления пар и комбинаций сосуществующих фаз проведен термодинамический анализ (по методике описанной в [4]) и рассчитано изменение свободной энергии Гиббса при температуре от 300 К до 1800 К (кДж/моль) для следующих реакций (приняты условные обозначения: $\text{CaO} - \text{C}$, $\text{FeO} - \text{F}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{A}$, $\text{SiO}_2 - \text{S}$):



Однако для проведения термодинамического анализа указанных реакций в справочной литературе отсутствовали данные о коэффициентах уравнения теплоемкости ряда соединений [5]. Нами по предложенному Н.А. Ландия энтропийному методу проведен расчет коэффициентов уравнения зависимости теплоемкости от температуры для следующих соединений:

$$Ca_2FeSi_2O_7 - a = 50,253; v = 22 \cdot 10^{-3}; c = -3,069 \cdot 10^5;$$

$$CaFeSi_2O_6 - a = 42,84; v = 17 \cdot 10^{-3}; c = -4,563 \cdot 10^5;$$

$$CaFeSiO_4 - a = 36,036; v = 7,293 \cdot 10^{-3}; c = -5,727 \cdot 10^5.$$

Также были рассчитаны коэффициенты уравнения зависимости теплоемкости для соединений $CaAl_{12}O_{19}$ и $Fe_2Al_4Si_5O_{18}$:

$$CaAl_{12}O_{19} - a = 50,253; v = 22 \cdot 10^{-3}; c = -3,069 \cdot 10^5;$$

$$Fe_2Al_4Si_5O_{18} - a = 50,253; v = 22 \cdot 10^{-3}; c = -3,069 \cdot 10^5.$$

Изменение свободной энергии Гиббса от температуры для приведенных выше реакций представлено на рис. 1.

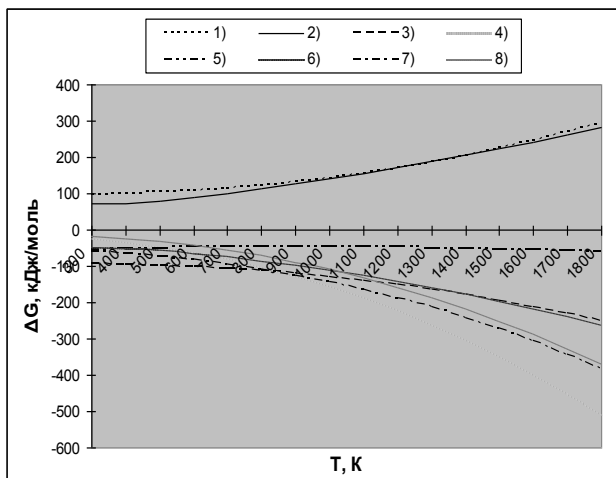


Рис. 1. Зависимость $\Delta G_T = f(T)$ для реакций в системе $CaO - FeO - Al_2O_3 - SiO_2$

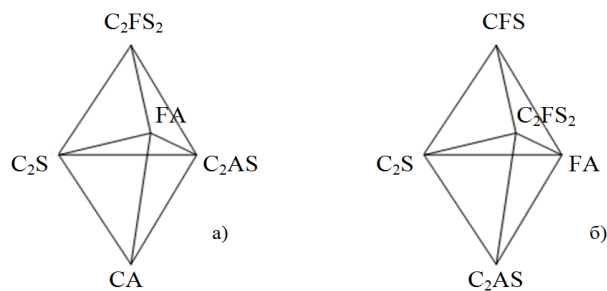


Рис. 2. Разбиение областей системы на элементарные тетраэдры
 а) область $C_2S - C_2AS - FA - C_2FS_2 - CA$;
 б) область $C_2S - FA - C_2FS_2 - CFS - C_2AS$;

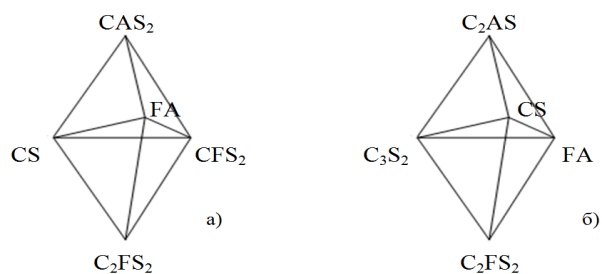


Рис. 3. Разбиение областей системы на элементарные тетраэдры
 в) область $CS - CFS_2 - FA - CAS_2 - C_2FS_2$;
 г) область $C_3S_2 - FA - CS - C_2AS - C_2FS_2$;

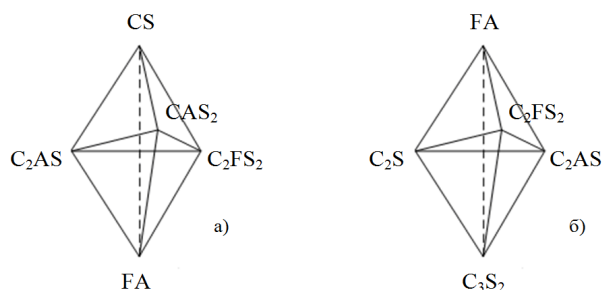


Рис. 4. Разбиение областей системы на элементарные тетраэдры
 д) область $C_2AS - C_2FS_2 - CAS_2 - CS - FA$;
 е) область $C_2S - C_2AS - C_2FS_2 - FA - C_3S_2$.

Установлено, что комбинации фаз $C_2S - C_2AS - FA$, $C_2S - FA - C_2FS_2$, $CS - CFS_2 - FA$, $C_3S_2 - FA - CS$ образуют “заполненный контур”, а конноды $C_2FS_2 - CA$, $CFS - C_2AS$, $CAS_2 - C_2FS_2$, $C_2AS - C_2FS_2$ соответственно не существуют (рис. 2 – 3), а комбинации фаз $C_2AS - C_2FS_2 - CAS_2$ и $C_2S - C_2AS - C_2FS_2$ образуют “пустой контур”, пронизанные коннодами $CS - FA$ и $FA - C_3S_2$ соответственно (рис. 4).

Таким образом, в системе $CaO - FeO - Al_2O_3 - SiO_2$ установлено наличие следующих внутренних коннод (попарно сосуществующих фаз): $C_2S - FA$; $C_3S_2 - FA$; $CS - FA$; $FA - CFS$; $FA - C_2FS_2$; $FA - CFS_2$;

FA – C₂AS; FA – CAS₂; F₂S – CAS₂; FS – CAS₂; CFS₂ – CAS₂; CAS₂ – F₂A₂S₅.

Характеристика внутренних коннод (длина конноды и минимальная температура появления расплава) приведена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика внутренних коннод (бинарных сечений) системы CaO – FeO – Al₂O₃ – SiO₂

№	Внутренняя коннода	T _i , К	L, %
1	C ₂ S – FA	1981	728,3
2	C ₃ S ₂ – FA	1699	717,3
3	CS – FA	1717	712,6
4	FA – CFS	1474	517,8
5	FA – C ₂ FS ₂	1048	577,7
6	FA – CFS ₂	1237	567,9
7	FA – C ₂ AS	1795	464,9
8	FA – CAS ₂	1772	472,5
9	F ₂ S – CAS ₂	1469	587,8
10	FS – CAS ₂	1407	485,9
11	CFS ₂ – CAS ₂	1238	332,8
12	CAS ₂ – F ₂ A ₂ S ₅	1476	216,2

По классификации А.С. Бережного [1], учитывающей количество элементарных тетраэдров, система относится к сложным системам (32 элементарных тетраэдра, положение которых в концентрационном тетраэдре приведено на рис. 5).

При установлении строения системы учтены 23 фазы: 4 оксида, составляющих систему, 13 бинарных по числу простых оксидов соединений, 6 тройных соединений. Четырехкомпонентных (по числу простых оксидов) соединений в исследуемой системе нами не обнаружено. В области субсолидуса система разбивается на 32 элементарных тетраэдра, характеристика которых (данные об объеме V_i и температуре появления расплава T_i) приведена в табл. 2.

Из данных табл. 2 видно, что минимальная температура появления расплава в системе CaO – FeO – Al₂O₃ – SiO₂ равна 1031 К, а соответствующий состав расположен в элементарном тетраэдре № 7 (F₂S – C₂FS₂ – CFS₂ – FA). Максимальная температура при которой еще сохраняется твердая фаза в системе, равна 1762 К (C₂AS – CA₂ – CA₆ – FA), а интервал плавления составляет 731 К.

Наиболее технологичными, учитывая объем элементарного тетраэдра, степень симметрии и минимальную температуру появления расплава, являются композиции тетраэдров C₂AS – CAS₂ – CA₆ – FA (V_i = 47,4%, T_i = 1710 К), CAS₂ – CA₆ – FA – A (V_i = 15%, T_i = 1740 К), A₃S₂ – CAS₂ – FA – A (V_i = 23,5%, T_i = 1738 К). Для технологии огнеупорных материалов наиболее приемлемыми являются композиции элементарных тетраэдров, включающих муллит, корунд (табл. 2, тетраэдр № 27). Составы огнеупорных композиций располагаются вблизи огнеупорных фаз системы или бинарных и трехкомпонентных сечений, включающих эти фазы. Например: C₂S – FA, A₃S₂ – A, A₃S₂ – CAS₂ – A.

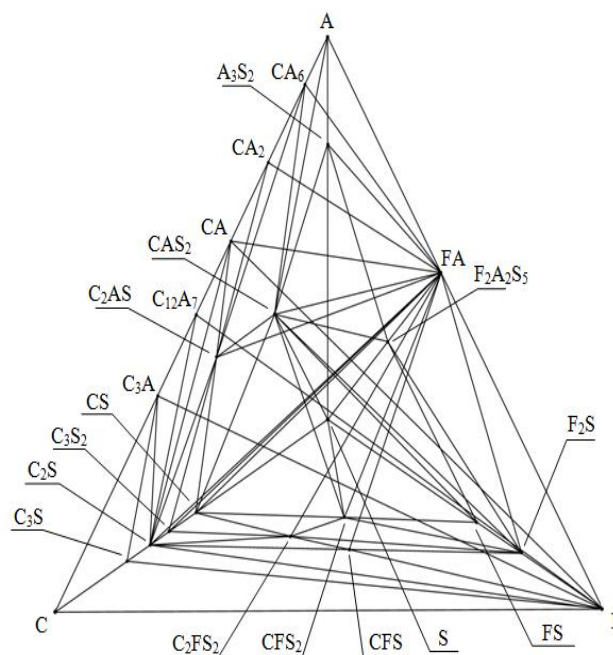


Рис 5. Элементарные тетраэдры системы CaO – FeO – Al₂O₃ – SiO₂

В системе имеется 44 комбинаций фаз по 3 (сечения, проходящие в трехмерном пространстве), непосредственно не следующих из 4 составляющих ее трехкомпонентных подсистем, которые легко найти в табл. 3. Установлено 4 “вставных” элементарных тетраэдров” (тетраэдры №№ 8, 16, 17, 21) у которых ни одна из граней не выходит на поверхность концентрационного тетраэдра. Имеется одна “висячая” точка – элементарный тетраэдр C – F – C₃S – C₃A, у которого три грани из четырех выходят на поверхность концентрационного тетраэдра.

Определены геометро-топологические характеристики фаз системы, к которым относятся следующие показатели: в скольких тетраэдрах присутствует данная фаза, со сколькими фазами сосуществует, объем существования (ΣV_i, суммарный объем всех элементарных тетраэдров в которых присутствует данная фаза), вероятность существования (ω) (табл. 3) [6].

Таблица 2
Элементарные тетраэдры системы CaO – FeO – Al₂O₃ – SiO₂

№	Фаза				Степень асимметрии	T _i , К	V _i , %
	а	б	в	г			
1	C –	F –	C ₃ S –	C ₃ A	3,8	1465	99,3
2	F –	C ₃ S –	C ₂ S –	C ₃ A	10,5	1522	32,3
3	F –	C ₂ S –	C ₃ A –	C ₁₂ A ₇	6,4	1525	47,9
4	F –	C ₂ S –	C ₁₂ A ₇	CA	6,7	1526	45,5
5	F –	F ₂ S –	CFS –	FA	2,0	1232	51,6
6	F ₂ S –	CFS –	C ₂ FS ₂ –	FA	4,6	1039	12,2
7	F ₂ S –	C ₂ FS ₂ –	CFS ₂ –	FA	4,6	1031	27,7
8	F ₂ S –	CAS ₂ –	CFS ₂ –	FA	1,8	1208	12,2
9	F ₂ S –	CAS ₂ –	F ₂ A ₂ S ₅ –	FA	2,7	1408	38,7
10	F ₂ S –	FS –	F ₂ A ₂ S ₅ –	CAS ₂	3,7	1290	10,2
11	F ₂ S –	FS –	CFS ₂ –	CAS ₂	3,7	1161	13,3
12	F –	C ₂ S –	CFS –	FA	2,4	1309	61,0
13	C ₂ S –	CFS –	C ₂ FS ₂ –	FA	5,8	1210	14,4
14	F –	C ₂ S –	CA –	FA	2,3	1468	72,6
15	C ₃ S ₂ –	C ₂ S –	C ₂ AS –	FA	10,7	1655	10,4
16	C ₂ S –	CA –	C ₂ AS –	FA	2,9	1684	19,0
17	C ₃ S ₂ –	C ₂ S –	C ₂ FS ₂ –	FA	10,7	1048	9,4
18	C ₂ AS –	C ₃ S ₂ –	CS –	FA	7,1	1577	15,5
19	C ₂ FS ₂ –	C ₃ S ₂ –	CS –	FA	7,1	1046	13,9
20	CAS ₂ –	CS –	CFS ₂ –	FA	2,6	1225	35,4
21	C ₂ FS ₂ –	CS –	CFS ₂ –	FA	5,7	1033	16,2
22	CS –	C ₂ AS –	CAS ₂ –	FA	3,4	1610	32,1
23	C ₂ AS –	CA –	CA ₂ –	FA	3,3	1676	12,6
24	C ₂ AS –	CA ₂ –	CA ₆ –	FA	3,6	1762	11,9
25	C ₂ AS –	CAS ₂ –	CA ₆ –	FA	2,4	1710	47,4
26	CAS ₂ –	CA ₆ –	FA –	A	6,7	1740	15,0
27	A ₃ S ₂ –	CAS ₂ –	FA –	A	2,0	1738	23,5
28	A ₃ S ₂ –	CAS ₂ –	F ₂ A ₂ S ₅ –	FA	2,2	1472	27,7
29	A ₃ S ₂ –	CAS ₂ –	F ₂ A ₂ S ₅ –	S	3,3	1455	32,1
30	FS –	CAS ₂ –	F ₂ A ₂ S ₅ –	S	2,5	1330	34,5
31	FS –	CFS ₂ –	CAS ₂ –	S	2,3	1166	45,1
32	CS –	CFS ₂ –	CAS ₂ –	S	1,8	1208	51,2
	Суммарный объем				1000		

Из табл. 3 следует, что с наибольшим количеством фаз сосуществуют фазы: FA, CAS₂, C₂S, F, F₂S, C₂AS (соответственно – 16, 11, 10, 9, 8, 8). Фаза FA присутствует в 22 элементарных тетраэдрах и имеет максимальный объем существования – 588,5 %. Значительные объемы существования в этой системе имеют фазы: CAS₂ (426,4), F (410,3), C₂S (312,7), CFS₂ (209,2).

В данной работе предпринята попытка моделирования изменения фазового состава в сечении муллитокорундовый огнеупор – металлургический шлак [7].

Для построения модели фазовых переходов шлак – огнеупор предложена следующая схема исследования.

1. Проведение химического анализа и установление оксидного состава шлака и огнеупора.
2. Установление многокомпонентной системы, включающей оксиды шлака и огнеупора.
3. Выявление фаз, входящих в заданную многокомпонентную систему.
4. Определение сосуществования фаз в системе.
5. Выявление возможных сопряженных и взаимных реакций.
6. Установление субсолидусного строения системы.
7. Установление взаимосвязи элементарных политопов – построение топологического графа их взаимосвязи.
8. Определение элементарных политопов в которых находится состав шлака и огнеупора.
9. Выявление пути (изменения фазового состава) на топологическом графе взаимосвязи элементарных политопов от состава шлака до состава огнеупора.
10. Расчет в каждом элементарном политопе изменения фазового состава в сечении шлак – огнеупор (через заданный интервал составов).
11. Построение модели изменения фазового состава в сечении шлак – огнеупор.

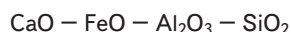
Для проведения полного исследования по первым пяти пунктам требуются высококвалифицированные кадры, значительные затраты материала, энергетических ресурсов, времени и др. Однако, при наличии данных по строению систем можно приступать к выполнению следующих пунктов схемы.

Пункты 6, 7. При изучении строения системы CaO – FeO – Al₂O₃ – SiO₂ нами установлено существование 32 элементарных тетраэдров,

Топологический граф плоский, имеется одно ложное пересечение. Установлено наличие 4 “вставных” элементарных тетраэдров (№№ 8, 16, 17, 21) и всего лишь одной “висячей” точки (тетраэдр №1).

Таблица 3

Геометро-топологическая характеристика фаз системы



№	Фаза	В сколь-ких тетраэдрах присутствует	Со сколь-кими фазами сосуществует	Объем Существования, ΣV_i , %	Вероятность существования, ω_i
1	C	1	3	99,3	0,0248
2	F	7	9	410,3	0,1026
3	A	2	4	38,5	0,0096
4	S	4	6	163,0	0,0408
5	C ₃ A	3	5	179,5	0,0449
6	C ₁₂ A ₇	2	4	93,4	0,0234
7	CA	4	6	149,7	0,0374
8	CA ₂	2	4	24,5	0,0061
9	CA ₆	3	5	74,3	0,0186
10	C ₃ S	2	4	131,6	0,0329
11	C ₂ S	9	10	312,7	0,0782
12	C ₃ S ₂	4	5	49,2	0,0123
13	CS	6	7	164,3	0,0411
14	FA	22	16	588,5	0,1471
15	F ₂ S	7	8	173,8	0,0435
16	FS	4	5	103,2	0,0258
17	A ₃ S ₂	3	5	83,3	0,0208
18	CFS	4	5	139,2	0,0348
19	C ₂ FS ₂	6	7	93,8	0,0235
20	CFS ₂	7	7	209,2	0,0523
21	C ₂ AS	7	8	148,9	0,0372
22	CAS ₂	14	11	426,4	0,1066
23	F ₂ A ₂ S ₅	5	6	143,2	0,0358
	Суммарный объем	---	---	4000,0	1,000
	Максимум	22	16	588,5	0,1471
	Минимум	1	3	24,5	0,0096

Пункт 8. Химический анализ шлака следующий (масс.%): CaO – 55,6; Al₂O₃ – 13,2; SiO₂ – 24,1; FeO – 0,49. Химический состав муллитокорундового огнеупора CaO – 2,68; Al₂O₃ – 80,6; SiO₂ – 13,7; FeO – 0,29. Определение нахождения состава шлака в элементарном тетраэдре проводилось путем решения системы уравнений 4-го порядка:

$$\begin{cases} A1 * X + B1 * Y + C1 * Z + D1 * T = E1 \\ A2 * X + B2 * Y + C2 * Z + D2 * T = E2 \\ A3 * X + B3 * Y + C3 * Z + D3 * T = E3 \\ A4 * X + B4 * Y + C4 * Z + D4 * T = E4 \end{cases}$$

A_i, B_i, C_i, D_i – содержание оксидов в компонентах, составляющих элементарный тетраэдр; E₁, E₂, E₃, E₄ – химический состав шлака;

X, Y, Z, T – содержание компонентов в исходной смеси.

Для тетраэдра, в котором находится состав шлака, должно выполняться условие:

$$X \geq 0, Y \geq 0, Z \geq 0, T \geq 0.$$

Такому условию отвечает элементарный тетраэдр C₂AS – CAS₂ – CA₆ – FA (№25, табл. 4), а теоретический фазовый состав шлака C₂AS – 2,01 масс.%; CAS₂ – 30,77 масс.%; CA₆ – 64,73 масс.%; FA – 2,49 масс.%. Составу огнеупора отвечает элементарный тетраэдр A₃S₂ – CAS₂ – FA – A (№ 27, табл. 4).

Таблица 4

Характеристика элементарных тетраэдров в сечении металлургический шлак – муллитокорундовый огнеупор

№	Элементарные тетраэдры	Объем V _i , %	Ti. K
25	C ₂ AS – CAS ₂ – CA ₆ – FA	47,4	1710
26	CAS ₂ – CA ₆ – FA – A	15,0	1740
27	A ₃ S ₂ – CAS ₂ – FA – A	23,5	1738

Пункт 9. На топологическом графе строим путь от состава шлака до состава огнеупора. Этот путь проходит через элементарные тетраэдры 25 – 26 – 27 (выделенный фрагмент на рис.5.), состав которых и их относительные объемы приведены в табл. 4.

Пункт 10. Проводится расчет фазового состава в сечении шлак – огнеупор в отдельных элементарных тетраэдрах через заданный интервал варьирования (шаг изменения состава – 1 масс.%) и определяется соответствующий тетраэдр в котором находится заданный состав.

Данные изменения теоретического фазового состава в 3 элементарных тетраэдрах приведены на рис. 7.

Пункт 11. Обобщая полученные результаты, строим модель изменения фазового состава шлак – огнеупор в системе CaO – FeO – Al₂O₃ – SiO₂. Данные изменения теоретического фазового состава в 3 элементарных тетраэдрах приведены на рис. 7 [103].

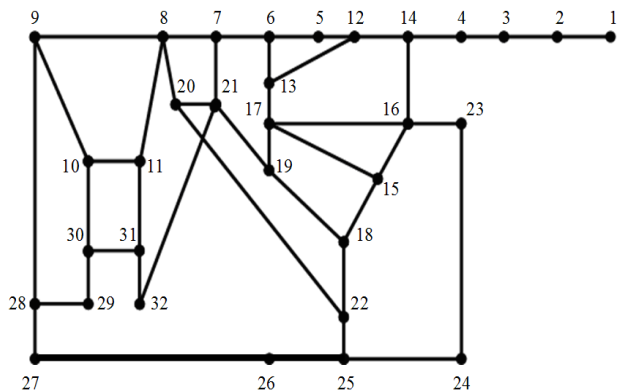


Рис. 6. Топологический граф взаимосвязи элементарных тетраэдров системы $\text{CaO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$. Выделен фрагмент взаимосвязи элементарных тетраэдров сечения: шлак (элементарный тетраэдр №25) – муллитокорундовый огнеупор (элементарный тетраэдр №27)

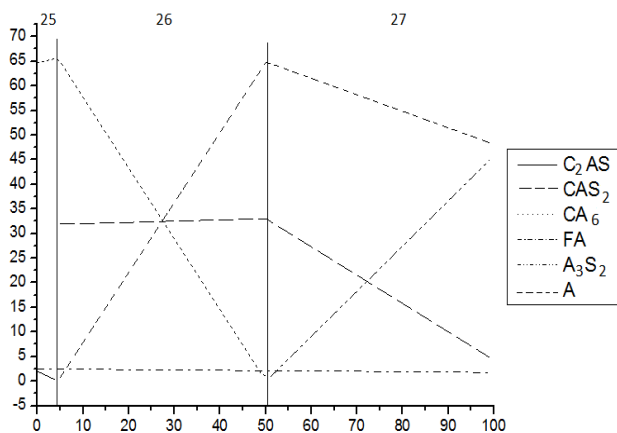


Рис. 7. Изменение фазового состава композиции шлак – огнеупор в элементарных тетраэдрах

Выводы

Установлено, что комбинации фаз $\text{C}_2\text{S} - \text{C}_2\text{AS} - \text{FA}$, $\text{C}_2\text{S} - \text{FA} - \text{C}_2\text{FS}_2$, $\text{CS} - \text{CFS}_2 - \text{FA}$, $\text{C}_3\text{S}_2 - \text{FA} - \text{CS}$ образуют “заполненный контур”, а конноды $\text{C}_2\text{FS}_2 - \text{CA}$, $\text{CFS} - \text{C}_2\text{AS}$, $\text{CAS}_2 - \text{C}_2\text{FS}_2$, $\text{C}_2\text{AS} - \text{C}_2\text{FS}_2$ соответственно не существуют (рис. 2 – 3), а комбинации фаз $\text{C}_2\text{AS} - \text{C}_2\text{FS}_2 - \text{CAS}_2$ и $\text{C}_2\text{S} - \text{C}_2\text{AS} - \text{C}_2\text{FS}_2$ образуют “пустой контур”, пронизанные коннодами $\text{CS} - \text{FA}$ и $\text{FA} - \text{C}_3\text{S}_2$ соответственно.

Наиболее технологичными, учитывая объем элементарного тетраэдра, степень асимметрии и минимальную температуру появления расплава, являются композиции тетраэдров $\text{C}_2\text{AS} - \text{CAS}_2 - \text{CA}_6 - \text{FA}$ ($V_i = 47,4\%$, $T_i = 1710 \text{ K}$), $\text{CAS}_2 - \text{CA}_6 - \text{FA} - \text{A}$ ($V_i = 15\%$, $T_i = 1740 \text{ K}$), $\text{A}_3\text{S}_2 - \text{CAS}_2 - \text{FA} - \text{A}$ ($V_i = 23,5\%$, $T_i = 1738 \text{ K}$). Для технологии огнеупорных материалов наиболее приемлемыми являются композиции элементарных тетраэдров, включающих муллит, корунд (табл. 2, тетраэдр № 27). Составы огнеупорных композиций располагаются вблизи огнеупорных фаз системы или бинарных и трехкомпонентных сечений, включающих эти фазы.

Определены геометро-топологические характеристики фаз системы, к которым относятся следующие показатели: в скольких тетраэдрах присутствует данная фаза, со сколькими фазами сосуществует, объем существования, вероятность существования.

Топологический граф плоский, имеется одно ложное пересечение. Установлено наличие 4 “вставных” элементарных тетраэдров (№№ 8, 16, 17, 21) и всего лишь одной “висячей” точки (тетраэдр №1).

На топологическом графе построен путь от состава шлака до состава огнеупора. Этот путь проходит через элементарные тетраэдры 25 – 26 – 27

Построена модель изменения фазового состава шлак – огнеупор в системе $\text{CaO} - \text{FeO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$.

Литература

1. Бережной, А. С. Многокомпонентные системы окислов [Текст] / Бережной А. С. – К.: Наукова думка, 1970. – 544 с.
2. Бережной, А. С. Многокомпонентные щелочные оксидные системы [Текст] / Бережной А. С. – К.: Наукова думка, 1988. – 200 с.
3. Диаграммы состояния силикатных систем. Справочник. Выпуск первый. Двойные системы [Текст] / Н.А. Торопов, В.П. Барзаковский, В.В. Лапин, Н.Н. Курцева / Под. ред. чл.-корр. АН СССР Н.А. Торопова. – М.: Наука, 1965. – 546 с.
4. Бабушкин, В. И. Термодинамика силикатов [Текст] / Бабушкин В. И., Матвеев Г. М., Мчедлов-Петросян О. П. – М.: Стройиздат, 1986. – 408 с.
5. Рыщенко, А.С. Термодинамический анализ реакций в системах, включающих оксид железа и огнеупорные оксиды [Текст] / А.С. Рыщенко, Я.Н. Питак, О.Я. Питак, Ю.О. Соболев // Международная научно-техническая конференция «Технология и применение огнеупоров и технической керамики в промышленности», (Харьков, 24 – 25 апреля 2012 г.) / ПАО «УКРНИИО Имени А.С. Бережного»: тезисы докладов. – Х., 2012. – С. 50.
6. О геометро-топологической характеристике фаз системы $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{FeO} - \text{SiO}_2$ [Текст] / Остапенко И. А., Питак Я. Н., Питак О. Я., Рыщенко А. С. // Вісник національного технічного університету “ХПІ” Тематичний випуск: Хімія, хімічні технології та екологія. – Харків: НТУ “ХПІ”, – 2008. – № 39. – С. 120 – 125.
7. Питак, Я. Н. Моделирование фазового состава в сечении шлак – огнеупор [Текст] / Питак Я. Н., Питак О. Я., Остапенко И. А. – Сборник докладов II семинара – совещания ученых, преподавателей, ведущих специалистов и молодых исследователей «Керамика и огнеупоры: перспективные решения и нанотехнологии». – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2009. – С. 299 – 303.