



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2023. Т. 23, вып. 2. С. 138–147

Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology, 2023, vol. 23, iss. 2, pp. 138–147

<https://ichbe.sgu.ru>

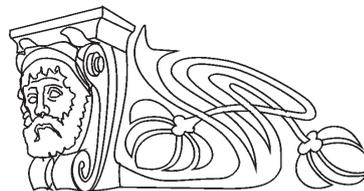
<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-2-138-147>, EDN: KPYLJX

Научная статья

УДК 544.01+544.971+544.013

Описание химического взаимодействия в системе $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

И. К. Гаркушин , О. В. Лаврентьева



Самарский государственный технический университет, Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244

Гаркушин Иван Кириллович, доктор химических наук, профессор кафедры «Общая и неорганическая химия», gik49@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6038-8519>

Лаврентьева Ольга Владимировна, кандидат химических наук, доцент кафедры «Общая и неорганическая химия», olavolga1965@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8110-2495>

Аннотация. Приводится построение древа фаз и описание химического взаимодействия для тройной оксидной системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. Особый интерес к системе, состоящей из оксидов кальция, алюминия и кремния, связан с получением высоко востребованных функциональных материалов с заданными свойствами. Расплавы системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ имеют большое теоретическое и прикладное значение. Это обусловлено значительной ролью расплавов этих оксидов и их смесей в металлургии, производстве керамики и других областях промышленности. Фазовые соотношения в системе при полном исчезновении жидкости в системе $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ позволили построить древо фаз системы, которое включает линейную часть и два цикла. Построение древа фаз приводится с учетом образования четырех двойных соединений в системе CaO-SiO_2 , пяти двойных соединений в системе $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$, одного двойного соединения в системе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ и двух тройных соединений. Стабильный комплекс включает пятнадцать вторичных фазовых треугольников, соединяющихся между собой шестнадцатью стабильными секущими. Для смесей, отвечающих точками эквивалентности (точками пересечения нестабильных и стабильных секущих) описано химическое взаимодействие в соответствии с законом эквивалентов. Сделан вывод, что для всех смесей, отвечающих точкам эквивалентности, для стандартных условий термодинамически возможны взаимодействия. Выполнен прогноз кристаллизующихся фаз.

Ключевые слова: тройная система, древо фаз, кристаллизующиеся фазы, стабильные секущие, нестабильные секущие, химическое взаимодействие, оксид кальция, оксид алюминия, оксид кремния, реакции метатезиса

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSSE-2023-0003) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета.

Для цитирования: Гаркушин И. К., Лаврентьева О. В. Описание химического взаимодействия в системе $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2023. Т. 23, вып. 2. С. 138–147. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-2-138-147>, EDN: KPYLJX

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Description of the chemical interaction in the system $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

I. K. Garkushin , O. V. Lavrenteva

Samara State Technical University, 244 Molodogvardeyskaya St., Samara 443100, Russia

Ivan K. Garkushin, gik49@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6038-8519>

Olga V. Lavrenteva, olavolga1965@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8110-2495>

Abstract. In this study the construction of a phase tree and the description of the chemical interaction for the ternary oxide system $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ are given. Particular interest to a system consisting of oxides of calcium, aluminum and silicon is associated with the production of highly demanded functional materials with desired properties. Melts of the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system are of great theoretical and applied importance. This is due to the significant role of melts of these oxides and their mixtures in metallurgy, ceramics production, and other industries. Phase relationships in the system with the complete disappearance of liquid in the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system has made it possible to construct a phase tree of the system, which includes a linear part and two cycles. The construction of the phase tree is given taking into account the formation of four double compounds in the CaO-SiO_2 system, five double compounds in the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ system, one double compound in the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system, and two ternary compounds. The stable complex includes fifteen secondary phase triangles, interconnected by sixteen stable secants. For mixtures corresponding to equivalence points (points of intersection of unstable and stable secants), the chemical interaction is described in accordance with the law of equivalents. It is concluded that for all mixtures corresponding to equivalence points, interactions are thermodynamically possible under standard conditions. The prediction of crystallizing phases is made.



Keywords: ternary system, phases tree, crystallizing phases, stable secants, unstable secants, chemical interaction, calcium oxide, aluminum oxide, silicon oxide, metathesis reaction

Acknowledgments. The work has been carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSSE-2023-0003) as part of the state task of the Samara State Technical University.

For citation: Garkushin I. K., Lavrenteva O. V. Description of the chemical interaction in the system $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2023, vol. 23, iss. 2, pp. 138–147 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-2-138-147>, EDN: KPYLJX

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Фазовая диаграмма системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ изучалась длительное время [1–6]. Особый интерес к этой системе связан с получением востребованных функциональных материалов с заданными свойствами. В частности, оксидные расплавы данной системы входят в основной состав металлургических шлаков. Этот факт имеет большое теоретическое и прикладное значение, так как расплавы системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ играют существенную роль в металлургии, производстве керамики и других областях промышленности [7–11]. Система $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ является базовой для получения и изучения цементов типа МТА, в составе которых присутствуют минералы ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) [9]. Анортитовый материал на основе системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ используется для получения износостойких керамических материалов повышенной прочности с относительно низкой температурой обжига [10]. Для современного металлургического производства большой интерес и распространение приобретают неорганические материалы на основе природных кремнеземсодержащих пород [12], являющихся основой теплоизолирующих смесей [13–17]. К таким материалам относят стеклообразующие оксидные смеси [18–20]. Входя в состав более сложных многокомпонентных систем, например, четырехкомпонентной системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2$, оксидная система $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ находит широкое применение в таких технологических процессах, как изготовление покрытий сварочных электродов, производство эмалей, стекло, огнеупоров, портландцемента, глиноземного цемента, известкового фарфора [21, 22]. Отмечается, что такие смеси образуются в качестве попутных продуктов при плавке и кристаллизации шлаковых расплавов, электрокорундов [20]. Анализ фазовых равновесий в четырехкомпонентной шлаковой системе $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$, содержащей в качестве составляющей трехкомпонентную систему $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, может быть использован для контроля неметаллических

включений, например, в раскисленной алюминием пружинной стали, изменение состава которой тесно связано с рафинированием шлаков и процессом раскисления [23].

Широкое применение системы оксидных расплавов $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ требует глубокого исследования физико-химических свойств. Исследованы вязкость и теплопроводность в жидкой и твердой фазах [12]. Особое внимание уделяется термодинамическим свойствам расплавов и соединений [24]. Термодинамические свойства неоднократно исследовались экспериментально [7]. Проводилось теоретическое моделирование термодинамических свойств различными методами [25–28].

В процессе плавления силикатных систем происходит ряд многообразных физико-химических и фазовых превращений [24]. Однако в литературе для тройной системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ не приведено древо фаз и не описаны возможные химические взаимодействия, включающие как реакции присоединения, так и реакции обмена.

Целью данного исследования является построение древа фаз и описание на его основе химического взаимодействия для смесей, отвечающих точкам пересечения стабильных и нестабильных секущих (точкам эквивалентности) и прогноз кристаллизующихся фаз.

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели следует рассмотреть бинарные системы, входящие в состав $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. Так, в системе CaO-SiO_2 образуется четыре двойных соединения (табл. 1). Два из этих соединений (Ca_3SiO_5 и CaSiO_3) являются соединениями конгруэнтного плавления, два (Ca_2SiO_4 и $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$) – соединения инконгруэнтного типа плавления. Отмечено образование трех эвтектик, двух перетектик и одной монотектики вблизи SiO_2 [1].

В системе $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ образуется пять бинарных соединений (см. табл. 1), которые в литературе указываются как соединения инконгруэнтного, или конгруэнтного и инконгруэнтного типа плавления [1, 2].



Таблица 1 / Table 1

Термические и термодинамические характеристики исходных веществ и соединений [29–31]
Thermal and thermodynamic characteristics of starting substances and compounds [29–31]

Вещество / Substances	Стандартные значения / Standard values		Температуры фазовых переходов, °C / Phase transition temperatures, °C	
	Энтальпия образования $\Delta_f H^\circ_{298}$, кДж/моль / Enthalpy of formation $\Delta_f H^\circ_{298}$, kJ/mol	Энергия Гиббса $\Delta_f G^\circ_{298}$, кДж/моль / Gibbs energy $\Delta_f G^\circ_{298}$, kJ/mol	Температура плавления / Melting temperature	Температура полиморфного перехода / Polymorph transition temperature
Al ₂ O ₃	-1675.692	-1582.271	2053±4	–
CaO	-635.089±0.962	-603.475	2627±30	–
SiO ₂	-910.940±1.422	-856.669	1728	–
Ca ₃ SiO ₅ (3CaO·SiO ₂)	-2930.473±2.928	-2785.104	2070±20	–
Ca ₂ SiO ₄ (2CaO·SiO ₂)	-2316.680±4.184	-2200.018	2130±20	–
Ca ₃ Si ₂ O ₇ (3CaO·2SiO ₂)	-3956.306±4.184	-3756.729	1464±5	–
CaSiO ₃ (CaO·SiO ₂)	-1635.232±1.673	-1549.598	1544±5	–
Al ₆ Si ₂ O ₁₃ (3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂)	-6819.920	-6436.448	1935±5	–
Ca ₃ Al ₂ O ₆ (3CaO·Al ₂ O ₃)	-3587.570±3.012	-3411.323	1535±5 к⇌ж+к ₁	–
Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃ (12CaO·7Al ₂ O ₃)	-19010.422±19.246	-18465.021	1374 к ₂ ⇌ж+к ₁	к ₂ → к ₁ 1037±10
CaAl ₂ O ₄ (CaO·Al ₂ O ₃)	-2326.178±1.799	-2208.666	1602±5 к⇌ж+к ₁	–
CaAl ₄ O ₇ (CaO·2Al ₂ O ₃)	-3987.770±6.276	-3822.460	1762±5 к⇌ж+к ₁	–
CaAl ₁₂ O ₁₉ (CaO·6Al ₂ O ₃)	-10742.838±12.970	-10160.538±14.225	1903	к ₂ → к ₁ 1833
CaAl ₂ Si ₂ O ₈ (CaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂)	-4243.412±2.928	-4017.773	1550±20	–
Ca ₂ Al ₂ S ₂ O ₇ (2CaO·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂)	-4007.853±2.928	-3809.121	1590±20	к ₂ → к ₁ 300

В двойной системе Al₂O₃-SiO₂ образуется одно двойное соединение – муллит 3Al₂O₃·2SiO₂, плавящееся конгруэнтно (см. табл. 1).

Трехкомпонентная система исследована ранее авторами [1, 2]. На основе данных по двойным и тройным соединениям (см. табл. 1) проведено разбиение на вторичные фазовые треугольники. Однако химическое взаимодействие, построение фазового комплекса и прогноз кристаллизующихся фаз не рассмотрены.

Результаты и их обсуждение

Фазовые соотношения в системе при полном исчезновении жидкости в системе CaO-Al₂O₃-SiO₂ (рис. 1) позволили построить древо фаз системы, которое включает линейную часть и два цикла (рис. 2).

Стабильный комплекс включает пятнадцать вторичных фазовых треугольников, соединяющихся между собой шестнадцатью

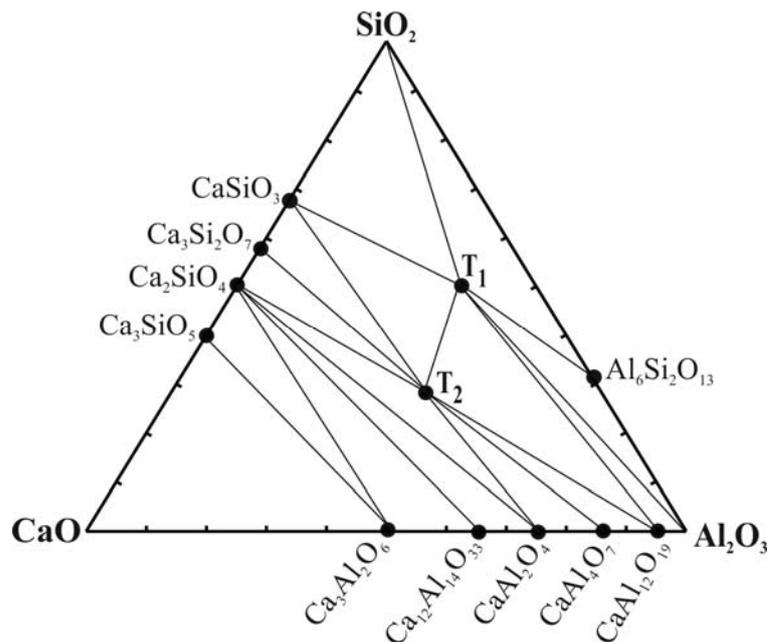


Рис. 1. Треугольник состава системы CaO-Al₂O₃-SiO₂: T₁ – CaAl₂Si₂O₈; T₂ – Ca₂Al₂SiO₇
 Fig. 1. Composition triangle of system CaO-Al₂O₃-SiO₂: T₁ – CaAl₂Si₂O₈; T₂ – Ca₂Al₂SiO₇

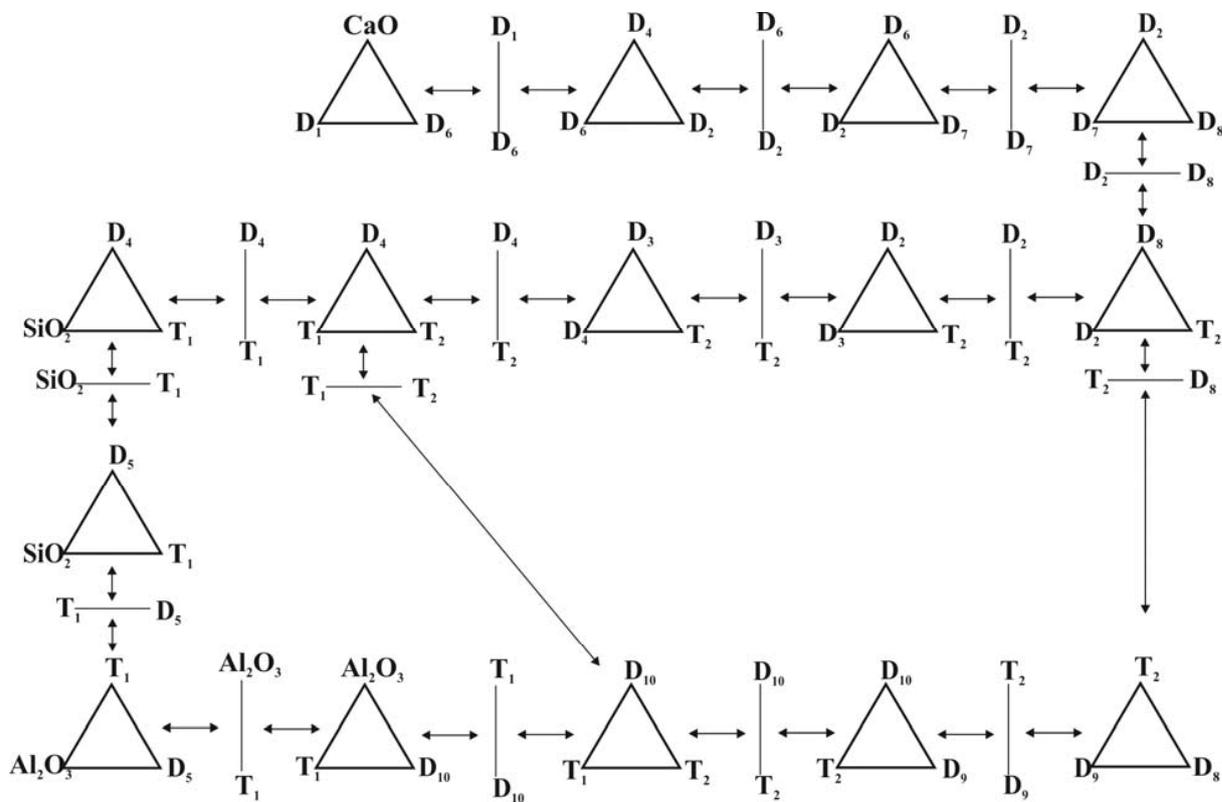


Рис. 2. Древо фаз системы CaO-Al₂O₃-SiO₂
 Fig. 2. Phase tree of the CaO-Al₂O₃-SiO₂



стабильными секущими. Кристаллизующиеся во вторичных треугольниках фазы отвечают веществам, расположенным в вершинах симплексов.

Для описания химического взаимодействия необходимы данные по индивидуальным веще-

ствам, двойным и тройным соединениям (см. табл. 1). Составы двойных и тройных соединений выражены в молярных концентрациях эквивалентов (табл. 2) и нанесены на треугольник состава (см. рис. 1).

Таблица 2 / Table 2

Молярные концентрации эквивалентов
Molar concentrations of equivalents

Точка / Point	Соединение / Compound	Состав / Compound
D ₁	Ca ₃ SiO ₅ ≡ 3CaO·SiO ₂	60 % CaO + 40 % SiO ₂
D ₂	Ca ₂ SiO ₄ ≡ 2CaO·SiO ₂	50 % CaO + 50 % SiO ₂
D ₃	Ca ₃ Si ₂ O ₇ ≡ 3CaO·2SiO ₂	42.85 % CaO + 57.15 % SiO ₂
D ₄	CaSiO ₃ ≡ CaO·SiO ₂	33.33 % CaO + 66.67 % SiO ₂
D ₅	Al ₆ Si ₂ O ₁₃ ≡ 3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	69.23 % Al ₂ O ₃ + 30.77 % SiO ₂
D ₆	Ca ₃ Al ₂ O ₆ ≡ 3CaO·Al ₂ O ₃	50 % CaO + 50 % Al ₂ O ₃
D ₇	Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃ ≡ 12CaO·7Al ₂ O ₃	36.36 % CaO + 63.64 % Al ₂ O ₃
D ₈	CaAl ₂ O ₄ ≡ CaO·Al ₂ O ₃	25 % CaO + 75 % Al ₂ O ₃
D ₉	CaAl ₄ O ₇ ≡ CaO·2Al ₂ O ₃	14.28 % CaO + 85.72 % Al ₂ O ₃
D ₁₀	CaAl ₁₂ O ₁₉ ≡ CaO·6Al ₂ O ₃	5.26 % CaO + 94.74 % Al ₂ O ₃
T ₁	CaAl ₂ Si ₂ O ₈ ≡ CaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO	12.50 % CaO + 37.50 % Al ₂ O ₃ + 50.00 % SiO ₂
T ₂	Ca ₂ Al ₂ Si ₂ O ₇ ≡ 2CaO·Al ₂ O ₃ ·SiO	28.57 % CaO + 42.85 % Al ₂ O ₃ + 28.58 % SiO ₂

Для описания химического взаимодействия необходимо в соответствии с законом эквивалентов [32, 33] получить смеси, отвечающие точкам эквивалентности, т.е. точкам пересечения стабильных и нестабильных секущих, аналогично тройным системам или тройным взаимным системам [34, 35]. Поэтому на треугольник состава (см. рис. 1), кроме стабильных (сплошные линии), нанесены (пунктиром) нестабильные секущие (рис. 3). В результате отмечено 100 пересечений со стабильными секущими. На рис. 3 нанесены только точки эквивалентности, в смесях которых термодинамически вероятны условия протекания реакций (табл. 3).

Как показывают данные табл. 3, энтальпии реакции для стандартных условий находятся в интервале от -11.087 кДж (точка 9) до -4912.480 кДж (точка 29). Энергии Гиббса реакций имеет интервал от -12.597 кДж (точка 40) до -4745.036 кДж (точка 29).

Заключение

Данные рис. 3 и табл. 3 показывают, что смеси различного состава на стабильных секущих могут быть получены из смесей, отвечающих

нескольким нестабильным секущим. Так, для секущей T₁-Al₂O₃ отмечено восемь нестабильных секущих (точки эквивалентности 31...33, 35...39), для стабильной секущей CaSiO₃-T₂ можно отметить семь нестабильных секущих (точки 5, 6, 8, 9, 10, 17, 18), для секущей Ca₂SiO₄-CaAl₂O₄ отмечается пять нестабильных секущих (точки 13, 14, 26, 27, 28), для секущей Ca₂SiO₄-Ca₃Al₂O₆ – четыре нестабильных секущих (точки 12, 16, 21, 22), для секущей T₂-CaSiO₃ (точки 1, 2, 3) и секущей Ca₂SiO₄-T₂ (точки 7, 13, 24) отмечается по три нестабильных секущих.

Тройное соединение T₂ (Ca₂Al₂SiO₇) может быть получено из смесей Ca₂SiO₄+Al₂O₃, Ca₃Al₂O₆+CaAl₂Si₂O₈, CaAl₂O₄+CaSiO₃, CaAl₄O₇+Ca₃Si₂O₇ в соотношениях 1:1. Максимальная энергия Гиббса реакции Δ_fG^o₂₉₈ = -189.146 кДж для исходной смеси Ca₃Al₂O₆ + CaAl₂Si₂O₈. Однако при проведении синтеза тройных соединений или стабильных смесей из нестабильных необходимо учитывать, какие реакции могут протекать вначале в соответствии с термодинамическими данными и возможным влиянием кинетики взаимодействия.

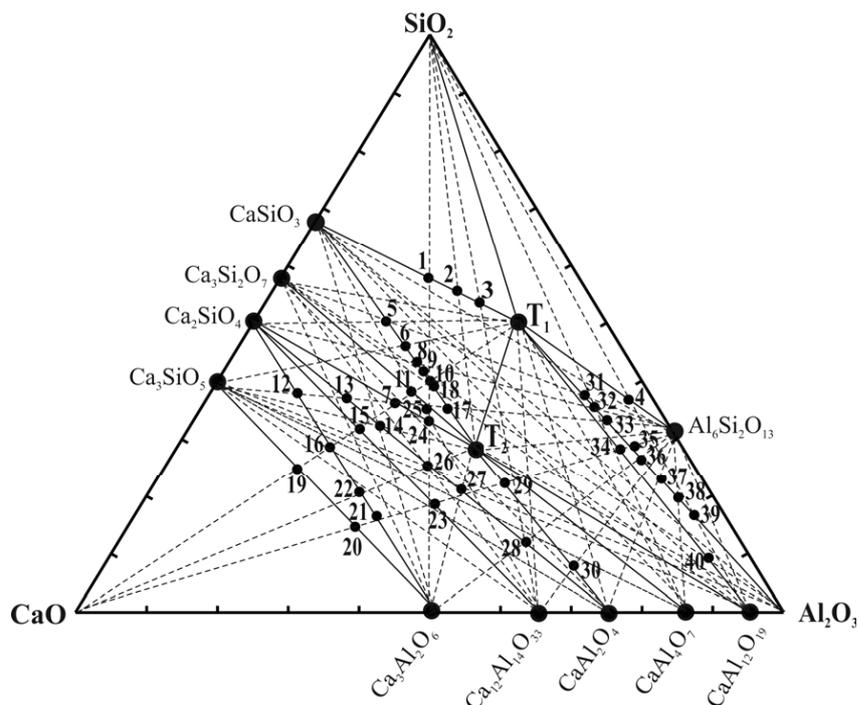


Рис. 3. Фазовый комплекс системы (составы – в молярных концентрациях эквивалентов)

Fig. 3. Phase complex of the system (compositions – in molar concentrations of equivalents)

Таблица 3 / Table 3

Уравнения реакций, тепловые эффекты и энергии Гиббса
Reaction equations, heat effects and Gibbs energy

Точка / Point	Уравнение реакции (точка на рис. 1) / Reaction equation (point on the Fig. 1)	Тепловой эффект реакций ($-\Delta_f H^\circ_{298}$), кДж / Heat effect of reaction ($-\Delta_f H^\circ_{298}$), kJ	Энергия Гиббса реакций ($-\Delta_f G^\circ_{298}$), кДж / Gibbs energy of reaction ($-\Delta_f G^\circ_{298}$), kJ
1	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 + 4\text{SiO}_2 = 2\text{CaSiO}_3 + \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	282.546	278.970
2	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 + 2\text{SiO}_2 = \text{CaSiO}_3 + \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	48.911	44.912
3	$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33} + 19\text{SiO}_2 = 5\text{CaSiO}_3 + 7\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	1561.762	1130.690
4	$3\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} + 16\text{SiO}_2 = 5\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13} + 3\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	26.282	47.241
5	$2\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 = 3\text{CaSiO}_3 + \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	36.777	40.106
6	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5 + \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 = 2\text{CaSiO}_3 + \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	104.432	105.440
T ₂	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	15.481	26.832
T ₂	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 + \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 = 2\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	184.724	189.146
T ₂	$\text{CaAl}_2\text{O}_4 + \text{CaSiO}_3 = \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	46.443	50.857
T ₂	$\text{CaAl}_4\text{O}_7 + \text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 = 2\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	2274.631	1652.847
7a	$4\text{Ca}_3\text{SiO}_5 + \text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13} = 3\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + 2\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	431.787	450.553
7б	$3\text{CaO} + \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 = \text{Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	175.854	180.941
7в	$\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 + \text{CaAl}_2\text{O}_4 = \text{Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	42.049	43.744
8	$5\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13} = 4\text{CaSiO}_3 + 3\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	161.167	189.217
9	$\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 + \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{CaSiO}_3 + \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	11.087	19.719



Окончание таблицы 3 / Continuation of the Table 3

Точка / Point	Уравнение реакции (точка на рис. 1) / Reaction equation (point on the Fig. 1)	Тепловой эффект реакций ($-\Delta_f H^\circ_{298}$), кДж / Heat effect of reaction ($-\Delta_f H^\circ_{298}$), kJ	Энергия Гиббса реакций ($-\Delta_f G^\circ_{298}$), кДж / Gibbs energy of reaction ($-\Delta_f G^\circ_{298}$), kJ
10	$2\text{CaO} + \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 = \text{CaSiO}_3 + \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	129.495	133.996
11	$5\text{CaO} + 2\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 = \text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 + 2\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	309.743	322.050
12	$3\text{Ca}_3\text{SiO}_5 + \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 = 4\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	55.018	46.962
13	$2\text{CaSiO}_3 + \text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 = 2\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{CaAl}_2\text{O}_4$	101.504	98.183
14	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5 + \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 = 2\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{CaAl}_2\text{O}_4$	21.212	14.477
15	$33\text{CaO} + 7\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 = 14\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$	782.121	1226.187
16	$6\text{CaO} + \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 = 2\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + 4\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	166.976	172.736
17	$3\text{Ca}_3\text{SiO}_5 + \text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13} = \text{Ca}_2\text{Si}_2\text{O}_7 + 3\text{Ca}_2\text{Al}_4\text{SiO}_7$	368.526	392.332
18	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 + 2\text{SiO}_2 = \text{CaSiO}_3 + \text{Ca}_2\text{Al}_4\text{SiO}_7$	233.635	234.058
19	$8\text{CaO} + \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 = 2\text{Ca}_3\text{SiO}_5 + \text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	124.384	135.95
20	$15\text{CaO} + \text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13} = 2\text{Ca}_3\text{SiO}_5 + 3\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	277.401	315.604
21	$13\text{CaO} + \text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13} = 2\text{CaSiO}_4 + 3\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	319.993	352.382
22	$3\text{CaO} + \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 = \text{Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	-88.700	-82.050
23a	$14\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 + 9\text{SiO}_2 = 9\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + 2\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$	446.521	1260.261
23б	$64\text{CaO} + 7\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13} = 14\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + 3\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$	1079.650	2517.779
24	$3\text{SiO}_2 + 2\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 = \text{Ca}_2\text{SiO}_4 + 2\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	424.426	425.607
25	$10\text{SiO}_2 + 5\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 = 2\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 + 6\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	4912.480	4745.036
26	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 + \text{SiO}_2 = \text{Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{CaAl}_2\text{O}_4$	144.348	140.692
27a	$\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13} + 7\text{CaO} = 2\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + 3\text{CaAl}_2\text{O}_4$	346.351	365.261
27б	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5 + \text{CaAl}_4\text{O}_7 = \text{Ca}_2\text{SiO}_4 + 2\text{CaAl}_2\text{O}_4$	50.788	9.786
28	$2\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33} + 5\text{SiO}_2 = 14\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + 5\text{CaAl}_2\text{O}_4$	1488.866	630.195
29	$10\text{CaO} + 2\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13} = 4\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 + 2\text{CaAl}_2\text{O}_4$	693.038	746.170
30	$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33} + \text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13} = 8\text{CaAl}_2\text{O}_4 + 2\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	794.788	386.101
31	$\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 + 2\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13} = 3\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 3\text{Al}_2\text{O}_3$	161.166	170.930
32	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + 3\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13} = 4\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 5\text{Al}_2\text{O}_3$	258.988	279.077
33	$2\text{Ca}_3\text{SiO}_5 + 5\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13} = 6\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 9\text{Al}_2\text{O}_3$	581.154	594.629
34	$4\text{CaO} + 3\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13} = 3\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + \text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$	203.959	490.613
35	$\text{CaO} + \text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13} = \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 2\text{Al}_2\text{O}_3$	139.787	142.392
36	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 + 3\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13} = 3\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 7\text{Al}_2\text{O}_3$	412.750	408.549
37	$\text{CaAl}_2\text{O}_4 + \text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13} = \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 3\text{Al}_2\text{O}_3$	124.390	119.472
86	$2\text{CaSiO}_3 + 7\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + \text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$	-14.058	3.218
38	$\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13} + \text{CaAl}_4\text{O}_7 = \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 4\text{Al}_2\text{O}_3$	138.490	87.949
39	$2\text{SiO}_4 + \text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} = \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 5\text{Al}_2\text{O}_3$	57.154	55.252
40	$\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 + 13\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 2\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$	-11.214	12.597
41	$3\text{CaAl}_2\text{O}_4 + \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 = 2\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 + \text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$	145.144	139.013



Список литературы

1. Бережной А. С. Многокомпонентные системы окислов. Киев : Наук. думка, 1970. 543 с.
2. Пащенко А. А., Мясников А. А., Мясникова Е. А. Физическая химия силикатов / под ред. А. А. Пащенко. М. : Высш. шк., 1986. 368 с.
3. Филоненко Н. Е., Лавров Л. В. Условия равновесия в углу Al_2O_3 тройной системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ // Журн. прикл. хим. 1950. № 23. С. 1040–1046.
4. Koziol A. M., Newton R. C. Redetermination of the anorthite breakdown reaction and improvement of the plagioclase-garnet- Al_2SiO_5 -quartz geobarometer // Am. Mineral. 1988. Vol. 73. P. 216–223.
5. Longhi J., Hays J. F. Phase equilibria and solid solution along the join $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{-SiO}_2$ // Am. J. Sci. 1979. Vol. 279, iss 7. P. 876–890. <https://doi.org/10.2475/ajs.279.7.876>
6. Rankin G. A., Wright F. E. The ternary system $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ // Am. J. Sci. 1915. Vol. s4-39 (229). P. 1–79.
7. Працкова С. Е., Бурмистров В. А., Старикова А. А. Термодинамическое моделирование оксидных расплавов системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2020. Т. 63, вып. 1. С. 45–50.
8. Кузьменков М. И., Сушкевич А. В., Манак Т. Н. Синтез клинкера для стоматологического цемента для пломбирования корневых каналов // Тр. БГТУ. Химия и технол. неорг. веществ. 2011. № 3. С. 79–83.
9. Сушкевич А. В., Кузьменков М. И., Шалухо Н. М., Манак Т. Н. Проявление метастабильного парагенезиса при твердофазовом взаимодействии в системе $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ // Тр. БГТУ. Химия и технол. неорг. веществ. 2012. № 3. С. 51–56.
10. Сергеевич О. А., Алексеенко И. А., Артемьев Е. А. Керамические материалы с повышенной износостойкостью для машиностроительной и легкой промышленности // Тр. Кольск. науч. центра РАН. 2017. Т. 8, № 5. С. 167–172.
11. Трибушевский Л. В., Немененок Б. М., Румянцева Г. А., Кулик М. А. Внепечная обработка стали отходами от переработки вторичного алюминия // Литье и металлургия. 2018. № 1 (90). С. 100–105.
12. Вильданов С. К. Расчет вязкости и теплопроводности стекол на основе системы $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-R}_2\text{O}$, где R – Na и K с добавками CaO, MgO, FeO при высокой температуре // Физика и химия стекла. 2021. Т. 47, № 3. С. 306–319.
13. Фукс Э., Савицки Й., Генералов А. В. Применение теплоизоляционных и экзотермических материалов фирмы «Foseco Steel» в ОАО «МЗ Камасталь» // Сталь. 2006. № 11. С. 46–51.
14. Шабловский В. А., Климов Ю. В., Онищенко Н. Ф. Специализированные смеси для сифонной разливки стали // Сталь. 2009. № 6. С. 21–24.
15. Вильданов С. К., Лиходиевский А. В., Пыриков А. Н. Разработка и внедрение энергосберегающих материалов для разливки стали // Новые огнеупоры. 2011. № 8. С. 3–6.
16. Ахметов А. Б. Разработка и освоение новых теплоизолирующих смесей для разливки стали // Сталь. 2008. № 8. С. 29–31.
17. Бабина И. А., Бабин А. О. Исследование свойств оксидных расплавов в модельном эксперименте // Расплавы. 2019. № 2. С. 133–141.
18. Топтыгин А. М., Полозов Е. Г., Айзин Ю. М. Совершенствование защитных шлакообразующих смесей для промежуточного ковша МНЛЗ // Сталь. 2007. № 3. С. 20–24.
19. Капитанов В. А., Куклев А. В., Полозов Е. Г. Исследование теплоизоляционных свойств шлаковых смесей для промежуточного ковша // Сталь. 2009. № 1. С. 28–31.
20. Вильданов С. К. Разработка и внедрение теплоизолирующих и шлакообразующих материалов серии «ИзоTERM-1600» // Сталь. 2018. № 9. С. 17–22.
21. Проводова А. А., Якушевич Н. Ф., Козырев Н. А. Определение термодинамической активности компонентов жидкой фазы системы $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\text{-CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\text{-CaO}\cdot\text{TiO}_2\cdot\text{SiO}_2$ в состоянии четырехфазного инвариантного равновесия // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2013. № 8. С. 27–32.
22. Байдерякова С. Молекулярно-динамическое исследование расплавов системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ // Неорганические материалы. 2001. Т. 37, № 5. С. 571–576.
23. Yao Z., Ma X.D., Lyu S. Phase equilibria of the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ -(0%, 5%, 10%) MgO slag system for non-metallic inclusions control // CALPHAD. Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. 2021. Vol. 72. Article № 102227. <https://doi:10.1016/j.calphad.2020.102227>
24. Шорников С. И. Термодинамические свойства расплавов системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ // Электрон. науч.-информ. журн. Вестник Отделения наук о Земле РАН. 2007. Т. 25, № 1. URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2007/informbul-1_2007/term-48.pdf.
25. Волокитин О. Г., Скрипникова Н. К. Расчет кривых плавкости многокомпонентных силикатных систем // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2016. Т. 59, вып. 11. С. 50–54.
26. Mao H. H., Hillert M., Selleby M., Sundman B. Thermodynamic assessment of the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system // J. Am. Ceram. Soc. 2006. Vol. 89, № 1. P. 298–308. <https://doi:10.1111/j.1551-2916.2005.00698>
27. Fabrichnaya O. B., Nerad I. Thermodynamic properties of liquid phase in the $\text{CaO center dot SiO}_2\text{-CaO center dot Al}_2\text{O}_3\text{ center dot 2SiO}_2\text{-2CaO center dot Al}_2\text{O}_3\text{ center dot SiO}_2$ system // J. Am. Ceram. Soc. Vol. 20, № 4. P. 505–515. [https://doi:10.1016/S0955-2219\(99\)00179-X](https://doi:10.1016/S0955-2219(99)00179-X)
28. Berman R. G., Brown T. H. A Thermodynamic model for multicomponent melts with application to the system $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ // Geochim. Cosmochim. Acta. 1984. Vol. 48, № 4. P. 661–678. [https://doi:10.1016/0016-7037\(84\)90094-2](https://doi:10.1016/0016-7037(84)90094-2)
29. Термические константы веществ. Вып. IV / под ред. акад. В. П. Глушко. М. : ВИНТИ, 1970. 510 с.



30. Термические константы веществ. Вып. IX / под ред. акад. В. П. Глушко. М. : ВИНТИ, 1981. 575 с.
31. Термические константы веществ. Вып. V / под ред. акад. В. П. Глушко. М. : ВИНТИ, 1971. 530 с.
32. Гаркушин И. К., Лаврентьева О. В., Штеренберг А. М. Древо фаз, прогноз кристаллизующихся фаз и описание химического взаимодействия в системе $KCl-CaCl_2-BaCl_2$ // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2022. Т. 22, вып. 3. С. 282–291. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-3-282-291>
33. Гаркушин И. К., Лаврентьева О. В., Штеренберг А. М. Прогноз кристаллизующихся фаз и описание химического взаимодействия в системе $Al_2O_3-TiO_2-MgO$ // Физика и химия стекла. 2022. Т. 48, № 2. С. 180–188.
34. Афиногенов Ю. П., Гончаров Е. Т., Семенова Г. В., Зломанов В. П. Физико-химический анализ многокомпонентных систем. М. : МФТИ, 2006. 332 с.
35. Гаркушин И. К., Сухаренко М. А., Бурчаков А. В. Теоретическое и экспериментальное исследование физико-химических систем. Самара : СамГТУ, 2019. 344 с.
1. Berezhnoy A. S. *Mnogokomponentnyye sistemy okislov* [Multicomponent Oxide Systems]. Kiyev, Naukova dumka, 1970. 543 p. (in Russian).
2. Pashchenko A. A., Myasnikov A. A., Myasnikova Ye. A. *Fizicheskaya khimiya silikatov. Pod red. A. A. Pashchenko* [Pashchenko A. A., ed. Physical Chemistry of Silicates]. Moscow, Vysshaya shkola, 1986. 368 p. (in Russian).
3. Filonenko N. Ye., Lavrov L. V. Conditions of the equilibrium in the corner Al_2O_3 of the ternary system $CaO-Al_2O_3-SiO_2$. *Russ. J. of Appl. Chem.*, 1950, vol. 23, pp. 1040–1046 (in Russian).
4. Koziol A. M., Newton R. C. Redetermination of the anorthite breakdown reaction and improvement of the plagioclase-garnet- Al_2SiO_5 -quartz geobarometer. *Am. Mineral.*, 1988, vol. 73, pp. 216–223.
5. Longhi J., Hays J. F. Phase equilibria and solid solution along the join $CaAl_2Si_2O_8-SiO_2$. *Am. J. Sci.*, 1979, vol. 279, iss. 7, pp. 876–890. <https://doi.org/10.2475/ajs.279.7.876>
6. Rankin G. A., Wright F. E. The ternary system $CaO-Al_2O_3-SiO_2$. *Am. J. Sci.*, 1915, vol. s4-39 (229), pp. 1–79.
7. Pratskova S. Ye., Burmistrov V. A., Starikova A. A. Thermodynamic modeling of oxide melts of the $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ system. *Izv. Universities. Chemistry and Chem. Technology*, 2020, vol. 63, iss. 1, pp. 45–50 (in Russian).
8. Kuzmenkov M. I., Sushkevich A. V., Manak T. N. Synthesis of clinker for dental cement for root canal filling. *Tr. BSTU. Chemistry and Technol. Inorg. Substances*, 2011, no. 3, pp. 79–83 (in Russian).
9. Sushkevich A. V., Kuzmenkov M. I., Shalukho N. M., Manak T. N. Manifestation of metastable paragenesis during solid-phase interaction in the $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ system. *Tr. BGTU. Chemistry and Technol. Inorg. Substances*, 2012, no. 3, pp. 51–56 (in Russian).
10. Sergievich O. A., Alekseenko I. A., Artem'ev E. A. Ceramic materials with increased wear resistance for machine-building and light industry. *Trudy Kolsk. Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2017, vol. 8, no. 5, pp. 167–172 (in Russian).
11. Tribushevsky L. V., Nemenenok B. M., Rumyantseva G. A., Kulik M. A. Out-of-furnace processing of steel by waste from secondary aluminum processing. *Casting and Metallurgy*, 2018, no. 1 (90), pp. 100–105 (in Russian).
12. Vildanov S. K. Calculation of viscosity and thermal conductivity of glasses based on the $SiO_2-Al_2O_3-R_2O$ system, where R is Na and K with CaO, MgO, FeO additives at high temperature. *Glass Phys.Chem.*, 2021, vol. 47, no. 3, pp. 306–319 (in Russian).
13. Fuks E., Savitskii I., Generalov A. V. Use of heat-insulating and exothermic materials made by Foseco Steel at the Kamastal Metallurgical Plant. *Stal*, 2006, no. 11, pp. 46–51 (in Russian).
14. Shablovsky V. A., Klimov Yu. V., Onishchenko N. F. Specialized mixtures for siphon casting of steel. *Stal*, 2009, no. 6, pp. 21–24 (in Russian).
15. Vildanov S. K., Likhodievskii A. V., Pyrikov A. N. Development and introduction of energy-saving materials for steel pouring. *New Refractories*, 2011, no. 8, pp. 3–6 (in Russian).
16. Akhmetov A. B. Development and development of new heat-insulating mixtures for steel casting. *Stal*, 2008, no. 8, pp. 29–31 (in Russian).
17. Babina I. A., Babin A. O. Research of properties of oxide melts in model experiment. *Journal Melts.*, 2019, no. 2, pp. 133–141 (in Russian).
18. Toptygin A. M., Polozov E. G., Aizin Y. M. Improving protective slag-forming mixtures for intermediate ladles of continuous-casting machines. *Stal*, 2007, no. 3, pp. 20–24 (in Russian).
19. Kapitanov V. A., Kuklev A. V., Polozov E. G. Research of heat-insulating properties of slag mixtures for tundish. *Stal*, 2009, no. 1, pp. 28–31 (in Russian).
20. Vildanov S. K. Development and implementation of heat-insulating and slag-forming materials of the Isotherm-1600 series. *Stal*, 2018, no. 9, pp. 17–22 (in Russian).
21. Provodova A. A., Yakushevich N. F., Kozyrev N. A. Determination of the thermodynamic activity of the components of the liquid phase of the $CaO \cdot SiO_2 - CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 - CaO \cdot TiO_2 \cdot SiO_2$ system in a state of four-phase invariant equilibrium. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, 2013, no. 8, pp. 27–32.
22. Baideryakova S. Molecular dynamics study of melts of the $CaO-Al_2O_3$ system. *Inorganic Materials*, 2001, vol. 37, no. 5, pp. 571–576 (in Russian).
23. Yao Z., Ma X. D., Lyu S. Phase equilibria of the $Al_2O_3-CaO-SiO_2$ -(0%, 5%, 10%) MgO slag system for non-metallic inclusions control. *CALPHAD. Computer*



- Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*, 2021, vol. 72, article no. 102227. [https://doi: 10.1016/j.calphad.2020.102227](https://doi.org/10.1016/j.calphad.2020.102227)
24. Shornikov S. I. Thermodynamic properties of melts of the CaO-Al₂O₃-SiO₂ system. *Electronic Scientific Information Journal "Herald of the Department of Earth Sciences RAS"*, 2007, vol. 25, no. 1. Available at: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2007/informbul-1_2007/term-48.pdf.
25. Volokitin O. G., Skripnikova N. K. Calculation of melting curves of multicomponent silicate systems. *Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology*, 2016, vol. 59, iss. 11, pp. 50–54 (in Russian).
26. Mao H. H., Hillert M., Selleby M., Sundman B. Thermodynamic assessment of the CaO-Al₂O₃-SiO₂ system. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2006, vol. 89, no. 1, pp. 298–308. [https://doi:10.1111/j.1551-2916.2005.00698](https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2005.00698)
27. Fabrichnaya O. B., Nerad I. Thermodynamic properties of liquid phase in the CaO center dot SiO₂-CaO center dot Al₂O₃ center dot 2SiO₂-2CaO center dot Al₂O₃ center dot SiO₂ system. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2000, vol. 20, no. 4, pp. 505–515. [https://doi:10.1016/S0955-2219\(99\)00179-X](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(99)00179-X)
28. Berman R. G., Brown T. H. A Thermodynamic model for multicomponent melts with application to the system CaO-Al₂O₃-SiO₂. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1984, vol. 48, no. 4, pp. 661–678. [https://doi:10.1016/0016-7037\(84\)90094-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90094-2)
29. *Termicheskie konstanty veshchestv. Vyp. IV* [Glushko V. P., ed. Thermal constants of substances. Issue IV]. Moscow, VINITI Publ., 1970. 510 p. (in Russian).
30. *Termicheskie konstanty veshchestv. Vyp. IX* [Glushko V. P., ed. Thermal constants of substances. Issue IX]. Moscow, VINITI Publ., 1979. 575 p. (in Russian).
31. *Termicheskie konstanty veshchestv. Vyp. V* [Glushko V. P., ed. Thermal constants of substances. Issue IX]. Moscow, VINITI Publ. 1971. 530 p. (in Russian).
32. Garkushin I. K., Lavrenteva O. V., Sterenberg A. M. Phase tree, forecast of crystallizing phases and description of chemical interaction in the system KCl-CaCl₂-BaCl₂. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2022, vol. 22, iss. 3, pp. 282–291 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-3-282-291>
33. Garkushin I. K., Lavrenteva O. V., Sterenberg A. M. Forecast of crystallizing phases and description of the chemical interaction in the Al₂O₃-TiO₂-MgO. *Glass Phys.Chem.*, 2021, vol. 47, no. 6, pp. 622–629.
34. Afinogenov Yu. P., Goncharov E. T., Semenova G. V., Zlomanov V. P. *Fiziko-khimicheskiy analiz mnogokomponentnykh sistem* [Physical and Chemical Analysis of Multicomponent Systems]. Moscow, MIPT Publ., 2006. 332 p.
35. Garkushin I. K., Sukharenko M. A., Burchakov A. V. *Teoreticheskoye i eksperimental'noye issledovaniye fiziko-khimicheskikh sistem* [Theoretical and Experimental Study of Physical and Chemical Systems]. Samara, SamGTU Publ., 2019. 344 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 29.12.22; одобрена после рецензирования 09.01.23; принята к публикации 10.01.23
The article was submitted 29.12.22; approved after reviewing 09.01.23; accepted for publication 10.01.23