

УДК 541.123.3

ДРЕВО ФАЗ, ПРОГНОЗ КРИСТАЛЛИЗУЮЩИХСЯ ФАЗ И ОПИСАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ $\text{MgO-SiO}_2\text{-TiO}_2$

© 2022 г. И. К. Гаркушин¹, М. А. Сухаренко¹, *¹Самарский государственный технический университет, ул. Молодогвардейская, 244, Самара, 443100 Россия*e-mail: sukhareno_maria@mail.ru

Поступила в редакцию 01.04.2022 г.

После доработки 21.06.2022 г.

Принята к публикации 24.06.2022 г.

На основании ранее изученной трехкомпонентной оксидной системы $\text{MgO-SiO}_2\text{-TiO}_2$ построено древо фаз, которое имеет линейное строение и включает пять стабильных треугольников, соединенных между собой четырьмя стабильными секущими. С использованием древа фаз проведен прогноз кристаллизующихся из расплава фаз с учетом элементов ограничения, в которых образуются пять двойных соединений. Для пересечений стабильных и нестабильных секущих в точках, отвечающих эквивалентному соотношению веществ, описаны основные реакции химического взаимодействия и проведен термодинамический расчет их направления для стандартных условий. Также для произвольных сочетаний веществ от 3 до 8, входящих в систему, методом атомного баланса описано химическое взаимодействие, в результате которого выявлены симплексы, включающие смеси после расплавления и кристаллизации. Оценка взаимодействия проведена с помощью термодинамических расчетов.

Ключевые слова: трехкомпонентная система, оксиды, древо фаз, стабильные и нестабильные секущие, химическое взаимодействие

DOI: 10.31857/S0002337X22110045

ВВЕДЕНИЕ

Фазовые равновесия в различных солевых и оксидных системах изучены в работах [1–19]. Смеси на основе двойных и тройной системы имеют важное прикладное значение для моделирования и исследования технологических процессов получения периклазовых, магнезитовых, форстеритовых огнеупоров, форстеритовой и стеатитовой радиокерамики, электрокерамики. Кроме реакций образования двойных соединений и тройных смесей, в оксидных системах возможно протекание реакций обмена (метатезиса), если на смежных сторонах треугольника составов образуются двойные соединения, что аналогично взаимодействию во взаимных системах.

Система $\text{MgO-SiO}_2\text{-TiO}_2$ исследована в работе [20]. Однако проведено только разбиение на пять вторичных фазовых треугольников, не построено древо фаз и не осуществлен прогноз кристаллизующихся фаз. Тройные соединения в системе не образуются. Псевдобинарная эвтектика в сечении $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-Mg}_2\text{TiO}_4$ плавится при 1910°C . По мнению авторов [20], тройная эвтектика в фазовом треугольнике $\text{MgSiO}_3\text{-TiO}_2\text{-SiO}_2$ плавится

при температуре около 1650°C . Полностью поверхность ликвидуса не изучена.

В настоящей работе предположено построение древа фаз, которое позволяет не только осуществить прогноз кристаллизующихся фаз в стабильных треугольниках и секущих элементах тройной системы, но и описать химическое взаимодействие.

ДРЕВО ФАЗ И ПРОГНОЗ КРИСТАЛЛИЗУЮЩИХСЯ ФАЗ

Данные по фазовым соотношениям в системе $\text{MgO-SiO}_2\text{-TiO}_2$ приведены в работе [20] (рис. 1). По полученным данным построено древо фаз, имеющее линейное строение (рис. 2), включающее пять стабильных треугольников: $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{-MgSiO}_3$, $\text{TiO}_2\text{-MgSiO}_3\text{-MgTi}_2\text{O}_5$, $\text{MgSiO}_3\text{-Mg}_2\text{SiO}_4\text{-MgTi}_2\text{O}_5$, $\text{MgTiO}_3\text{-Mg}_2\text{SiO}_4\text{-Mg}_2\text{TiO}_4$, $\text{Mg}_2\text{TiO}_4\text{-Mg}_2\text{SiO}_4\text{-MgO}$, соединяющихся между собой четырьмя стабильными секущими $\text{TiO}_2\text{-MgSiO}_3$, $\text{MgSiO}_3\text{-MgTi}_2\text{O}_5$, $\text{MgTiO}_3\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$, $\text{Mg}_2\text{TiO}_4\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$.

Древо фаз позволяет провести прогноз кристаллизующихся фаз в стабильных и секущих элементах системы $\text{MgO-SiO}_2\text{-TiO}_2$ с учетом данных по

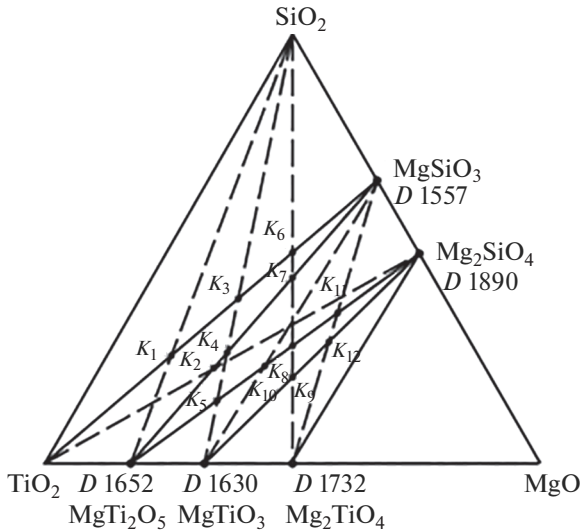


Рис. 1. Стабильный и нестабильный комплексы системы MgO–SiO₂–TiO₂.

ограничающим элементом и индивидуальным веществам (табл. 1–3) [20, 21]. Кристаллизующиеся фазы представлены в основном индивидуальными веществами, кроме Mg₂TiO₄, который образуется со стороны MgO ограниченный твердый раствор (ОТР) (табл. 3). Также Mg₂TiO₄ образует в Mg₂SiO₄ ОТР до 4 мас. % Mg₂TiO₄ [20].

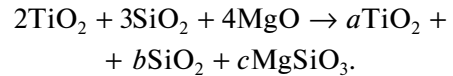
ОПИСАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Основные реакции химического взаимодействия описываются в точках пересечения ста-

бильных и нестабильных секущих аналогично описанию взаимодействия во взаимных системах [22–24]. Точки пересечения *K* являются диагоналями четырехугольников в тройных системах (табл. 4) [25, 26]. В табл. 5 приведены расчетные значения энтальпий и энергий Гиббса реакций обмена, протекающих в системе. Анализ табл. 5 показывает, что одной стабильной секущей может отвечать несколько нестабильных секущих (при различном соотношении нестабильных веществ). В табл. 6 стабильным секущим TiO₂–MgSiO₃, MgSiO₃–MgTi₂O₅ и Mg₂SiO₄–MgTi₂O₅ отвечают по три нестабильных секущих, а стабильной секущей MgTiO₃–Mg₂SiO₄ – две нестабильных секущих.

Кроме основных реакций в точках эквивалентности *K*, могут протекать реакции и фазовые превращения после расплавления и кристаллизации смесей из 3...8 соединений. Для их идентификации необходимо применить метод атомного баланса в левой и правой частях уравнений при переборе симплексов [20].

Возьмем исходную смесь оксидов в соотношении 2TiO₂ + 3SiO₂ + 4MgO и определим, в какой симплекс после расплавления и кристаллизации попадает смесь. Рассмотрим симплекс TiO₂–SiO₂–MgSiO₃ и запишем правую часть уравнения с неизвестными коэффициентами при веществах:



Приравняем число атомов Ti, Si и Mg в левой и правой частях уравнения реакции и составим си-

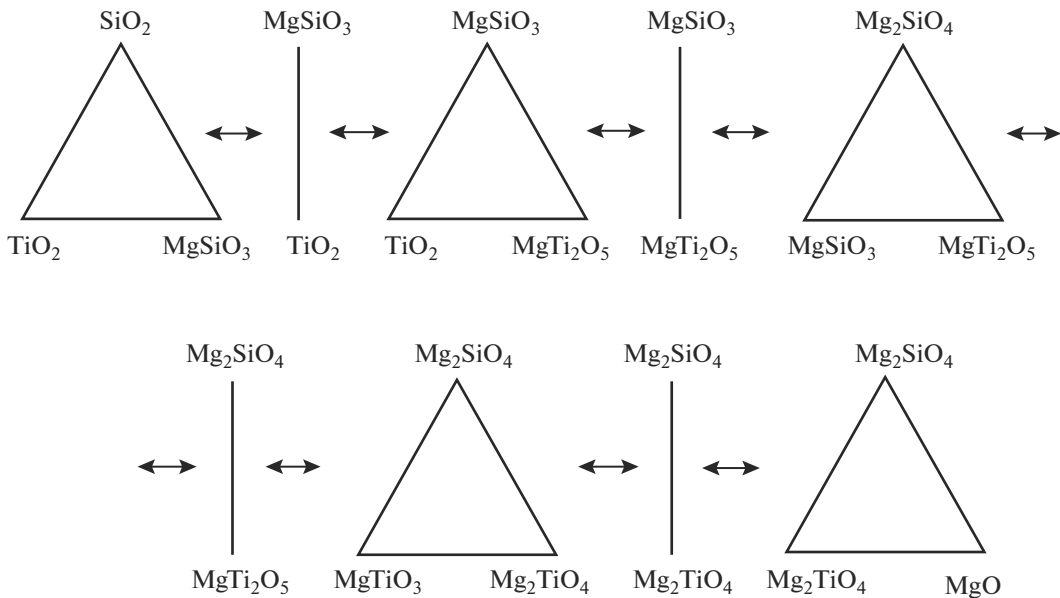


Рис. 2. Древо фаз системы MgO–SiO₂–TiO₂.

Таблица 1. Данные по индивидуальным веществам тройной системы MgO–SiO₂–TiO₂

| Вещество | Температура плавления, °C | $\Delta_f H_{298}^\circ$, кДж/моль | $\Delta_f G_{298}^\circ$, кДж/моль |
|--|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| MgO | 2825 ± 25 | -601.491 ± 0.292 | -569.254 |
| TiO ₂ | 1870 ± 15 | -943.868 ± 0.962 | -888.610 |
| SiO ₂ | 1728 | -910.940 ± 1.422 | -856.669 |
| Mg ₂ TiO ₄ (D ₁) | 1750 ± 15 | -2164.000 ± 1.631 | -2047.444 |
| MgTiO ₃ (D ₂) | 1660 ± 20 | -1571.928 ± 1.464 | -1483.587 |
| MgTi ₂ O ₅ (D ₃) | 1650 ± 20 | -2507.889 ± 2.928 | -2367.470 ± 3.472 |
| MgSiO ₃ (D ₄) | 1560 ± 5 | -1548.946 | -1462.098 |
| Mg ₂ SiO ₄ (D ₅) | 1887 ± 10 | -2171.914 ± 2.092 | -2052.929 |

Примечание. D – дистектика (соединение с конгруэнтным типом плавления).

Таблица 2. Данные по двухкомпонентным системам тройной системы MgO–SiO₂–TiO₂ [20]

| Система | Данные по невариантным точкам | |
|--|--|--|
| | координаты точек | фазовые равновесия |
| TiO ₂ –SiO ₂ | <i>m</i> 1780°C, 7 мас. % SiO ₂ ; <i>n</i> 81 мас. % SiO ₂ | $J_m \rightleftharpoons J_n + TiO_2$ |
| | <i>e</i> 1550°C; 89.5 мас. % SiO ₂ | $J \rightleftharpoons SiO_2 + TiO_2$ |
| MgO–SiO ₂ | <i>D</i> ₅ 1890°C | $J \rightleftharpoons Mg_2SiO_4$ |
| | <i>p</i> ₁ 1557°C, 62 мас. % SiO ₂ | $J + Mg_2SiO_4 \rightleftharpoons MgSiO_3$ |
| | <i>p</i> ₂ 1543°C, 63.5 мас. % SiO ₂ | $J + MgSiO_3 \rightleftharpoons SiO_2$ |
| | <i>m</i> 1703°C | $J_m \rightleftharpoons J_n + MgO$ |
| MgO–TiO ₂ | <i>D</i> ₁ (~1490...1732°C) | $J \rightleftharpoons Mg_2TiO_4$ |
| | <i>D</i> ₂ 1630°C | $J \rightleftharpoons MgTiO_3$ |
| | <i>D</i> ₃ 1652°C | $J \rightleftharpoons MgTi_2O_5$ |
| | <i>e</i> ₁ 1707°C, 34.5 мас. % TiO ₂ | $J \rightleftharpoons MgO + Mg_2TiO_4$ |
| | <i>e</i> ₂ 1583°C, 61 мас. % TiO ₂ | $J \rightleftharpoons Mg_2TiO_4 + MgTiO_3$ |
| | <i>e</i> ₃ 1592°C, 72 мас. % TiO ₂ | $J \rightleftharpoons MgTiO_3 + MgTi_2O_5$ |
| <i>e</i> ₄ 1606°C, 91 мас. % TiO ₂ | $J \rightleftharpoons MgTi_2O_5 + TiO_2$ | |

Примечание. *m, n* – монотектика (начало и окончание области расщепления соответственно).

Таблица 3. Кристаллизующиеся фазы в стабильных и секущих элементах системы MgO–SiO₂–TiO₂

| Стабильная секущая | Фазы | Стабильный треугольник | Фазы |
|--|---|--|--|
| TiO ₂ –MgSiO ₃ | TiO ₂ , MgSiO ₃ | TiO ₂ –SiO ₂ –MgSiO ₃ | TiO ₂ , SiO ₂ , MgSiO ₃ |
| MgTi ₂ O ₅ –MgSiO ₃ | MgTi ₂ O ₅ , MgSiO ₃ | TiO ₂ –MgSiO ₃ –MgTi ₂ O ₅ | TiO ₂ , MgSiO ₃ , MgTi ₂ O ₅ |
| MgTi ₂ O ₅ –Mg ₂ SiO ₄ | MgTi ₂ O ₅ , Mg ₂ SiO ₄ | MgSiO ₃ –MgTi ₂ O ₅ –Mg ₂ SiO ₄ | MgSiO ₃ , MgTi ₂ O ₅ , Mg ₂ SiO ₄ |
| MgTiO ₃ –Mg ₂ SiO ₄ | MgTiO ₃ , Mg ₂ SiO ₄ | MgTi ₂ O ₅ –Mg ₂ SiO ₄ –MgTiO ₃ | MgTi ₂ O ₅ , Mg ₂ SiO ₄ , MgTiO ₃ |
| Mg ₂ TiO ₄ –Mg ₂ SiO ₄ | Mg ₂ TiO ₄ , Mg ₂ SiO ₄ | MgTiO ₃ –Mg ₂ SiO ₄ –Mg ₂ TiO ₄ | MgTiO ₃ , Mg ₂ SiO ₄ , Mg ₂ TiO ₄ |
| | | Mg ₂ TiO ₄ –Mg ₂ SiO ₄ –MgO | Mg ₂ TiO ₄ , Mg ₂ SiO ₄ (ОТР), MgO (ОТР) |

Таблица 4. Элементы диаграммы, в которых протекают основные реакции

| Точка диаграммы | Секущие | | Четырехугольники |
|-----------------|---------------------|-----------------------|---|
| | нестабильные | стабильные | |
| K_1 | $MgTi_2O_5-SiO_2$ | $TiO_2-MgSiO_3$ | $TiO_2-SiO_2-MgSiO_3-MgTi_2O_5$ |
| K_2 | $TiO_2-Mg_2SiO_4$ | $MgTi_2O_5-MgSiO_3$ | $TiO_2-MgSiO_3-Mg_2SiO_4-MgTi_2O_5$ |
| K_3 | $MgTiO_3-SiO_2$ | $TiO_2-MgSiO_3$ | $MgTiO_3-MgSiO_3-SiO_2-TiO_2$ |
| K_4 | $MgTiO_3-SiO_2$ | $MgTi_2O_5-MgSiO_3$ | $MgTiO_3-MgSiO_3-SiO_2-TiO_2$ |
| K_5 | $MgTiO_3-SiO_2$ | $MgTi_2O_5-Mg_2SiO_4$ | $MgTiO_3-MgSiO_3-SiO_2-TiO_2$ |
| K_6 | $Mg_2TiO_4-SiO_2$ | $TiO_2-MgSiO_3$ | $Mg_2TiO_4-Mg_2SiO_4-SiO_2-TiO_2$ |
| K_7 | $Mg_2TiO_4-SiO_2$ | $MgTi_2O_5-MgSiO_3$ | $Mg_2TiO_4-Mg_2SiO_4-SiO_2-TiO_2$ |
| K_8 | $Mg_2TiO_4-SiO_2$ | $MgTi_2O_5-Mg_2SiO_4$ | $Mg_2TiO_4-Mg_2SiO_4-SiO_2-TiO_2$ |
| K_9 | $Mg_2TiO_4-SiO_2$ | $MgTiO_3-Mg_2SiO_4$ | $Mg_2TiO_4-Mg_2SiO_4-MgSiO_3-MgTiO_3$ |
| K_{10} | $MgTiO_3-MgSiO_3$ | $MgTi_2O_5-Mg_2SiO_4$ | $MgTiO_3-Mg_2SiO_4-MgSiO_3-MgTi_2O_5$ |
| K_{11} | $Mg_2TiO_4-MgSiO_3$ | $MgTi_2O_5-Mg_2SiO_4$ | $Mg_2TiO_4-Mg_2SiO_4-MgSiO_3-MgTi_2O_5$ |
| K_{12} | $Mg_2TiO_4-MgSiO_3$ | $MgTiO_3-Mg_2SiO_4$ | $Mg_2TiO_4-Mg_2SiO_4-MgSiO_3-MgTiO_3$ |

Таблица 5. Тепловые эффекты и энергии Гиббса реакций для смесей, отвечающих точкам эквивалентности K

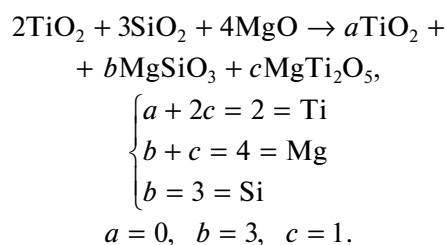
| Точка конверсии | $\Delta_r H_{298}^\circ$, кДж | $\Delta_r G_{298}^\circ$, кДж |
|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|
| K_1 | +17.853 | +15.179 |
| K_2 | +28.150 | +0.581 |
| K_3 | -9.946 | -10.452 |
| K_4 | -2.033 | -5.725 |
| K_5 | +10.960 | +2.648 |
| K_6 | -55.880 | -52.024 |
| K_7 | -93.907 | -88.869 |
| K_8 | -166.760 | -133.944 |
| K_9 | -76.830 | -68.546 |
| K_{10} | +12.999 | +8.873 |
| K_{11} | -72.793 | -45.075 |
| K_{12} | -30.896 | -26.974 |

стему линейных уравнений для определения коэффициентов a , b и c :

$$\begin{cases} a = 2 = \text{Ti} \\ b + c = 3 = \text{Si} \\ c = 4, \\ a = 2, \quad c = 4, \quad b = -1. \end{cases}$$

Так как $b = -1$, то смесь после расплавления и кристаллизации не принадлежит фазовому треугольнику $TiO_2-SiO_2-MgSiO_3$.

Рассмотрим симплекс $TiO_2-MgSiO_3-MgTi_2O_5$ и проведем аналогичное описание:



Отрицательных коэффициентов нет, поэтому уравнение в окончательном виде можно записать как

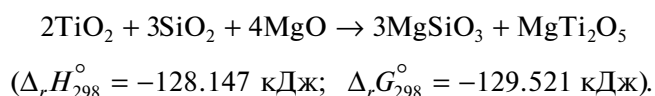


Таблица 6. Стабильные и нестабильные секущие

| Стабильные секущие | Нестабильные секущие и соотношение веществ |
|---|--|
| $TiO_2-MgSiO_3$ (K_1, K_2, K_3) | $SiO_2-MgTi_2O_5$ |
| | $SiO_2-MgTiO_3$ |
| | (2) $SiO_2-Mg_2TiO_4$ |
| $MgSiO_3-MgTi_2O_5$ (K_4, K_5, K_6) | (2) $TiO_2-Mg_2SiO_4$ |
| | (2) $MgTiO_3-SiO_2$ |
| | (2) $Mg_2TiO_4-(3) SiO_2$ |
| $MgTi_2O_5-Mg_2SiO_4$ (K_7, K_8, K_9, K_{10}) | (4) $MgTiO_3-SiO_2$ |
| | (2) $MgTiO_3-MgSiO_3$ |
| | (2) $Mg_2TiO_4-(3) SiO_2$ |
| | $Mg_2TiO_4-MgSiO_3$ |
| $MgTiO_3-MgSiO_4$ (K_{11}, K_{12}) | (2) $Mg_2TiO_4-SiO_2$ |
| | $Mg_2TiO_4-MgSiO_3$ |

Проверяем правильность написания по числу атомов кислорода в левой и правой частях уравнения реакции: $14 = 14$.

Таким образом, после расплавления и кристаллизации конечная смесь расположена на стабильной секущей $MgSiO_3-MgTi_2O_5$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Древо фаз системы позволило провести прогноз кристаллизующихся после расплавления и кристаллизации фаз. Стабильным секущим отвечает несколько нестабильных секущих (табл. 6).

Как видно из табл. 6, стабильной секущей $MgTi_2O_5-Mg_2SiO_4$ отвечают четыре нестабильных секущих. Двум стабильным секущим $TiO_2-MgSiO_3$ и $MgSiO_3-MgTi_2O_5$ отвечают по три нестабильных секущих, а стабильной секущей $MgTiO_3-MgSiO_4$ соответствуют две нестабильные секущие.

Как видно из табл. 5, реакции в смесях, соответствующих точкам эквивалентности K_1, K_2, K_5, K_{10} , практически невозможны, так как для стандартных значений энергии Гиббса $\Delta_r G_{298}^\circ > 0$.

Не все возможные пересечения стабильных и нестабильных секущих могут быть описаны реакциями химического взаимодействия.

Энергия Гиббса $\Delta_r G_{298}^\circ$ смесей, отвечающих точкам эквивалентности K_1 и K_2 , больше нуля. Однако, как отмечается в работе [20], секущая $TiO_2-MgSiO_3$ является настолько стабильной, что TiO_2 и $MgSiO_3$ не реагируют между собой и при давлении 1.5 ГПа. Поэтому при высоких тем-

пературах вполне осуществимы реакции для смесей, отвечающих точкам K_1 и K_2 .

Используя метод атомного баланса, можно определять принадлежность сплавов из 3–8 исходных смесей после расплавления и кристаллизации к какому-либо стабильному симплексу системы. Таким образом, показана возможность синтеза стабильного сочетания фаз из исходных соединений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построено фазовое древо системы $MgO-SiO_2-TiO_2$, имеющее линейное строение и включающее пять стабильных треугольников, соединяющихся между собой четырьмя стабильными секущими. На основании древа фаз проведен прогноз кристаллизующихся фаз и описаны основные реакции как для точек пересечения стабильных и нестабильных секущих, так и для различных сочетаний исходных веществ методом атомного баланса. Используя данный метод, можно проводить корректировку шихты из оксидов, двойных оксидов при определении смеси после расплавления и кристаллизации в соответствующем стабильном треугольнике.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проектной части государственного задания № 0778-2020-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ilatovskaja M., Saenko I., Savinykh G.* Experimental Study of Phase Equilibria in the $Al_2O_3-MgO-TiO_2$

- System and Thermodynamic Assessment of the Binary MgO–TiO₂ system // *J. Am. Ceram. Soc.* 2018. V. 101. № 11. P. 5198–5218.
2. Guo C.H., Zhang Y.X. Multicomponent Diffusion in Silicate Melts: SiO₂–TiO₂–Al₂O₃–MgO–CaO–Na₂O–K₂O System // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2019. V. 259. P. 412–412.
 3. Федоров П.П. Фазовые диаграммы систем дифторида свинца с трифторидами редкоземельных элементов // *Журн. неорганической химии.* 2021. Т. 66. № 2. С. 250–258.
<https://doi.org/10.31857/S0044457X21020070>
 4. Шестаков В.А., Косьяков В.И. Особенности трансформации фазовой диаграммы трехкомпонентной системы со стехиометрическими соединениями при изменении параметров ее состояния // *Журн. неорганической химии.* 2021. Т. 66. № 3. С. 377–381.
<https://doi.org/10.31857/S0044457X21030168>
 5. Shi J.J., Chen M., Santoso I. 1250°C Liquidus for the CaO–MgO–SiO₂–Al₂O₃–TiO₂ System in Air // *Ceram. Int.* 2020. V. 46. № 2. P. 1545–1550.
 6. Shi J.J., Chen M., Wan X.B. Phase Equilibrium Study of the CaO–SiO₂–MgO–Al₂O₃–TiO₂ System at 1300°C and 1400°C in Air // *J. Mater.* 2020. V. 72. № 9. P. 3204–3212.
 7. Юрченко Д.А., Евстропьев С.К., Шашкин А.В. и др. Модифицирование MgO–Al₂O₃–TiO₂–SiO₂ стекла диффузией серебра для формирования люминесцентных молекулярных кластеров // *Докл. Рос. акад. наук. Химия, науки о материалах.* 2021. Т. 499. № 1. С. 40–44.
<https://doi.org/10.31857/S2686953521040099>
 8. Nurgali N., Sariev O., Mukhambetkaliyev A., Momenov B., Kuandykova A., Abdrashev R. Phase Composition Of Titanium-Containing Raw Materials Depending on its Titanium Oxide Content // *Metalurgija (Zagreb, Croatia).* 2021. V. 60. № 3–4. P. 374–376.
 9. Алиев А.Р., Ахмедов И.Р., Какагасанов М.Г., Алиев З.А. Состояние кристаллической структуры Li₂SO₄, предшествующее фазовому переходу I рода // *Неорганические материалы.* 2020. Т. 56. № 3. С. 278–282.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X20020025>
 10. Бушуев Н.Н., Егорова А.Н., Тюльбенджян Г.С. Система KLa(SO₄)₂–CaSO₄ // *Неорганические материалы.* 2021. Т. 57. № 2. С. 150–153.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X21020044>
 11. Гаматаева Е.Ю., Курбанова С.Н., Гасаналиев А.Н. и др. Фазовые равновесия в системе LiCl–LiVO₃–V₂O₅ // *Неорганические материалы.* 2020. Т. 56. № 2. С. 145–150.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X20020050>
 12. Нипан Г.Д., Корнилов Д.Ю. Фазовые равновесия в системе Li₂O–Al₂O₃–Ni–CO–O // *Неорганические материалы.* 2020. Т. 56. № 8. С. 854–859.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X20070118>
 13. Базарова Ж.Г., Логвинова А.В., Базаров Б.Г. Фазообразование в системах Rb₂MoO₄–R₂(MoO₄)₃–ZR(MoO₄)₂ (R – Al, Fe, Cr, Y) // *Неорганические материалы.* 2020. Т. 56. № 12. С. 1350–1355.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X20120040>
 14. Вердиев Н.Н., Гаркушин И.К., Бурчаков А.В. Фазовые равновесия в системе NaF–NaCl–NaBr–Na₂CrO₄ // *Неорганические материалы.* 2020. Т. 56. № 11. С. 1243–1251.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X20110159>
 15. Асадов М.М., Ахмедова Н.А., Мамедова С.Р. и др. Фазовые равновесия и электрические свойства образцов Li₂O–B₂O₃–YB₂O₃ // *Журн. неорганической химии.* 2020. Т. 65. № 7. С. 974–981.
<https://doi.org/10.31857/S0044457X20070016>
 16. Огарков А.И., Восков А.Л., Ковалев И.А. и др. Термодинамическое моделирование фазовых равновесий в системе U–Zr–N // *Неорганические материалы.* 2021. Т. 57. № 8. С. 829–837.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X21080236>
 17. Данилушкина Е.Г., Гаркушин И.К., Тарасова Н.С. Исследование фазовых равновесий в трехкомпонентной взаимной системе K⁺, Ba²⁺||Br[–], MoO₄^{2–} // *Неорганические материалы.* 2021. Т. 57. № 12. С. 1337–1343.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X21120046>
 18. Сухаренко М.А., Гаркушин И.К., Зубкова А.В. Фазовые равновесия в трехкомпонентной взаимной системе Na⁺, Ba²⁺||Br[–], SO₄^{2–} // *Неорганические материалы.* 2021. Т. 57. № 8. С. 852–860.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X21080303>
 19. Нипан Г.Д. Фазовые равновесия в системе Cd–Ga–As–Te // *Неорганические материалы.* 2021. Т. 57. № 12. С. 1281–1285.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X21120125>
 20. Бережной А.С. Многокомпонентные системы окислов. Киев: Наук. думка, 1970. 544 с.
 21. Термические константы веществ. База данных / Институт теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур РАН, Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. <http://www.chem.msu.su/cgi-bin/tkv.pl?show=welcom.html> (дата обращения: 06.06.2022).
 22. Радищев В.П. Многокомпонентные системы / Под ред. Перельман Ф.М. М.: ИОНХ АН СССР, 1964. 502 с.
 23. Сечной А.И., Гаркушин И.К. Фазовый комплекс многокомпонентных систем и химическое взаимодействие. Самара: СамГТУ, 1999. 116 с.
 24. Сечной А.И. Моделирование равновесного состояния смесей фаз многокомпонентных физико-химических систем: автореф. дис. ... докт. хим. наук. Новосибирск. 2003. 39 с.
 25. Афиногенов Ю.П., Гончаров Е.Г., Семенова Г.В., Зломанов В.П. Физико-химический анализ многокомпонентных систем. М.: МФТИ, 2006. 332 с.
 26. Garkushin I.K., Lavrenteva O.V., Shterenberga A.M. Forecast of Crystallizing Phases and Description of the Chemical Interaction in the Al₂O₃–TiO₂–MgO System // *Glass Phys. Chem.* 2021. V. 47. № 6. P. 622–629.