

УДК 541.123.3

## ДРЕВО ФАЗ, ПРОГНОЗ КРИСТАЛЛИЗУЮЩИХСЯ ФАЗ И ОПИСАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ NaF–KF–MgF<sub>2</sub>

© 2024 г. И. К. Гаркушин, М. А. Сухаренко, Е. М. Дворянова

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

\*e-mail: [sukhareno\\_maria@mail.ru](mailto:sukhareno_maria@mail.ru)

Поступила в редакцию 22.10.2023 г.

После доработки 18.03.2024 г.

Принята к публикации 19.03.2024 г.

В трехкомпонентной системе NaF–KF–MgF<sub>2</sub> проведено разбиение на симплексы геометрическим методом и построено древо фаз, которое имеет линейное строение и состоит из четырех стабильных треугольников, разделенных тремя стабильными секущими. Прогноз числа и состава кристаллизующихся фаз для стабильных элементов системы осуществлен на основе полученного древа фаз. Описание химического взаимодействия в трехкомпонентной системе проведено методом ионного баланса. Соединения, находящиеся на двойных сторонах треугольника составов, позволили получить четырехугольники с диагоналями, в точках пересечения которых протекают реакции обмена – основные реакции, происходящие в системе. Экспериментальные исследования, проведенные методом термогравиметрии, подтверждают протекание реакций на сторонах и внутри треугольника составов.

**Ключевые слова:** физико-химический анализ, метод ионного баланса, трехкомпонентная система, соединение конгруэнтного плавления, точка эквивалентности

**DOI:** 10.31857/S0002337X24020102, **EDN:** LHTCDZ

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение фазовых равновесий в различных многокомпонентных системах – водных [1–4], органических [5, 6], оксидных [7, 8], солевых [9–14] и металлических [15–18] – представляет большой интерес для исследователей. Тем не менее, расплавляемые солевые смеси из галогенидов щелочных и щелочноземельных элементов остаются недостаточно хорошо изученными. Исследование фазовых равновесий и химического взаимодействия в многокомпонентных солевых системах имеет важное значение: как фундаментальное – для пополнения базы данных по системам различной мерности, так и практическое – для разработки новых составов функциональных материалов.

Цель настоящей работы – теоретическое и экспериментальное исследование трехкомпонентной системы из фторидов натрия, калия и магния.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объекта исследования выступает трехкомпонентная солевая система из фторидов натрия, калия и магния [19]. Построение древа фаз изучаемой системы проведено геометрическим методом. Древо фаз позволило провести прогноз числа и состава кристаллизующихся фаз. Теоретическое описание химического взаимодействия проведено методом ионного баланса с учетом термодинамических данных по индивидуальным веществам и двойным соединениям.

Экспериментальные исследования проводили методом термогравиметрического анализа на дериватографе Q-1200 в режиме контролируемой скорости нагревания 20°С/мин до 1100°С на воздухе в платиновых тиглях. Составы всех смесей, приведенных в работе, выражены в молярных концентрациях эквивалентов. Масса исходных смесей

Таблица 1. Данные по индивидуальным веществам [20–22]

Вещество	Температура плавления, °С	Энтальпия образования, $\Delta_f H_{298}^{\circ}$ , кДж/моль	Энергия Гиббса образования, $\Delta_f G_{298}^{\circ}$ , кДж/моль	Энтальпия образования, $\Delta_f H_{1073}^{\circ}$ , кДж/моль	Энергия Гиббса образования, $\Delta_f G_{1073}^{\circ}$ , кДж/моль
NaF	996±1	-572.831	-542.572	-334.591	-368.792
KF	858±1	-566.095	-536.426	-575.667	-491.597
MgF <sub>2</sub>	1263±3	-1124.240	-1071.124	-1118.935	-984.357
NaMgF <sub>3</sub>	1029.5±1	-1713.766	-1635.496	-1694.602	-1476.314
KMgF <sub>3</sub>	1075±20	-1690.335	-1607.550	-1453.526	-1353.149
K <sub>2</sub> MgF <sub>4</sub>	870	-2256.43	-2143.976	-1788.117	-1721.941

составляла 1 г, точность взвешивания составов на аналитических весах ±0.0001 г.

В работе использовали реактивы следующих марок: NaF «ч.д.а.» (ГОСТ 4463-76, содержание основного вещества 99.0%), KF «ч.д.а.» (ГОСТ ГОСТ 20848-75, 99.5%), MgF<sub>2</sub> «ч.» (ГОСТ 7204-77, 99.0%). Температуры плавления фторидов натрия и калия соответствовали справочным данным [20–22], температуру плавления фторида магния не измеряли, поскольку это не позволяли осуществить условия эксперимента.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Трехкомпонентная система NaF–KF–MgF<sub>2</sub> была исследована ранее визуально-политермическим методом, построена поверхность ликвидуса (рис. 1) [19]. В настоящей работе

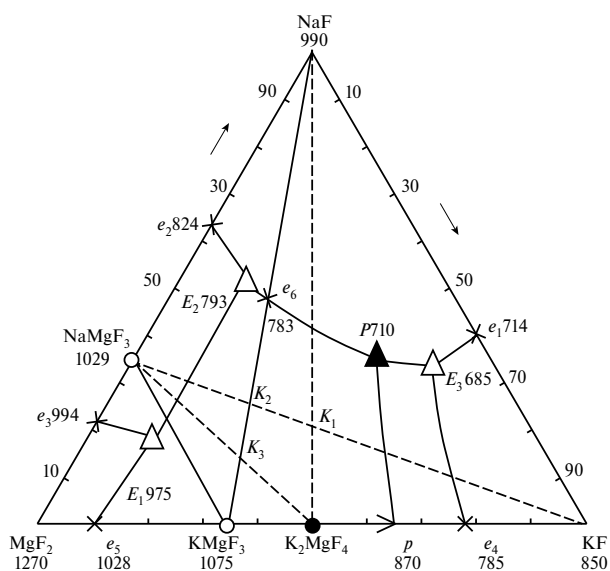


Рис. 1. Проекция фазового комплекса трехкомпонентной системы NaF–KF–MgF<sub>2</sub> на треугольник составов.

построено древо фаз системы с учетом того, что на стороне NaF–MgF<sub>2</sub> образуется одно соединение NaMgF<sub>3</sub>, а на стороне KF–MgF<sub>2</sub> образуются два соединения – KMgF<sub>3</sub> и K<sub>2</sub>MgF<sub>4</sub>. Древо фаз системы линейное, включает четыре стабильных треугольника MgF<sub>2</sub>–NaMgF<sub>3</sub>–KMgF<sub>3</sub>, NaF–NaMgF<sub>3</sub>–KMgF<sub>3</sub>, NaF–KMgF<sub>3</sub>–K<sub>2</sub>MgF<sub>4</sub>, NaF–K<sub>2</sub>MgF<sub>4</sub>–KF, соединяющиеся между собой стабильными секущими NaMgF<sub>3</sub>–KMgF<sub>3</sub>, NaFKMgF<sub>3</sub>, KF–K<sub>2</sub>MgF<sub>4</sub>, являющимися общими сторонами двух смежных стабильных треугольников (рис. 2).

В табл. 1 приведены данные по индивидуальным веществам: температуры плавления, а также энтальпии и энергии Гиббса образования для стандартных условий и для температуры, близкой к температурам плавления тройных эвтектик системы (800°C) [20–23]. Данные по температурам плавления и составам двойных и тройных эвтектик системы сведены в табл. 2 [19, 24]. Видно, что соединение K<sub>2</sub>MgF<sub>4</sub> – инконгруэнтного плавления (872°C), соединения KMgF<sub>3</sub> (1050°C) и NaMgF<sub>3</sub> (1023°C) – конгруэнтного плавления. Данные по температурам плавления соединений в табл. 1 и 2 различаются, в дальнейших исследованиях принимаем данные, приведенные в табл. 1 [20–22].

В работе спрогнозированы количество и составы кристаллизующихся фаз в стабильных секущих и стабильных треугольниках с использованием данных табл. 1 и 2. Результаты прогноза сведены в табл. 3.

Древо фаз, кроме прогноза кристаллизующихся фаз, является основой для описания физико-химического взаимодействия методом ионного баланса, так как соедине-

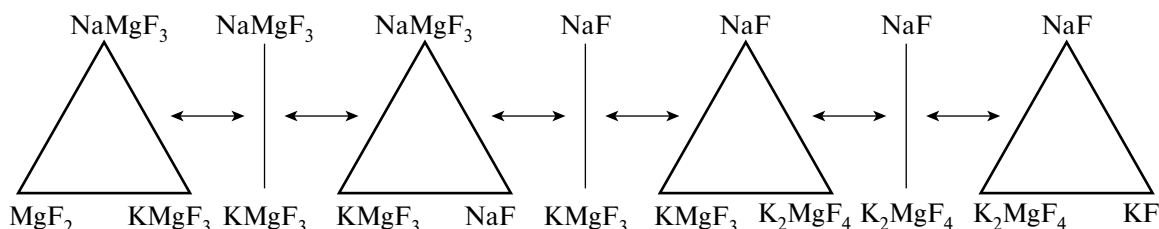
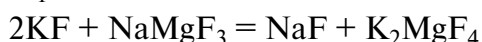


Рис. 2. Древо фаз системы NaF–KF–MgF<sub>2</sub>.

ния позволяют получить четырехугольники с диагоналями, для смесей в точках пересечения которых возможно протекание реакций обмена – основных реакций:

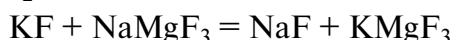
Точка K<sub>1</sub>:



$$(\Delta_r H^\circ_{298} = + 16.7 \text{ кДж}; \Delta_r G^\circ_{298} = + 21.8 \text{ кДж}),$$

$$(\Delta_r H^\circ_{800} = 0 \text{ кДж}; \Delta_r G^\circ_{800} = 0 \text{ кДж});$$

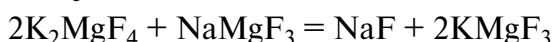
Точка K<sub>2</sub>:



$$(\Delta_r H^\circ_{298} = + 16.7 \text{ кДж}; \Delta_r G^\circ_{298} = + 21.8 \text{ кДж}),$$

$$(\Delta_r H^\circ_{800} = 0 \text{ кДж}; \Delta_r G^\circ_{800} = 0 \text{ кДж});$$

Точка K<sub>3</sub>:



$$(\Delta_r H^\circ_{298} = + 16.7 \text{ кДж}; \Delta_r G^\circ_{298} = + 21.8 \text{ кДж}),$$

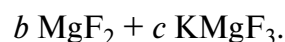
$$(\Delta_r H^\circ_{800} = 0 \text{ кДж}; \Delta_r G^\circ_{800} = 0 \text{ кДж}).$$

Приведенные реакции термодинамически невозможны при стандартных условиях. Для температуры 800°C все реакции в точках конверсии находятся в состоянии равнове-

сия, следовательно, секущие являются стабильными.

Кроме основных реакций в точках конверсии K, метод ионного баланса позволил на основе древа фаз описать взаимодействие для смесей, входящих в систему NaF–KF–MgF<sub>2</sub>.

1. Возьмем исходную смесь, включающую соли 2NaF + 3KF + 4MgF<sub>2</sub>. Запишем уравнение для симплекса NaMgF<sub>3</sub>–MgF<sub>2</sub>–KMgF<sub>3</sub> в общем виде:



Для определения коэффициентов a, b, c составим систему линейных уравнений для ионов

$$\begin{cases} a = 2 = Na^+ \\ c = 3 = K^+ \\ a + b + c = 4 = Mg^{2+} \end{cases}$$

$$a = 2, c = 3, b = -1.$$

Так как коэффициент b < 0, то после расплавления и кристаллизации состав не принадлежит симплексу NaMgF<sub>3</sub>–MgF<sub>2</sub>–KMgF<sub>3</sub>.

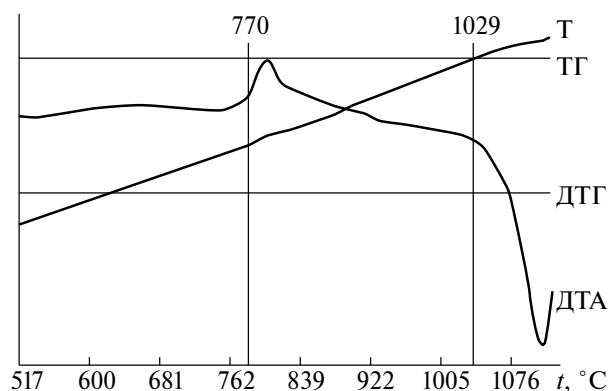


Рис. 3. Результаты термического анализа при нагреве образца состава 33.3% NaF + 66.7% MgF<sub>2</sub>.

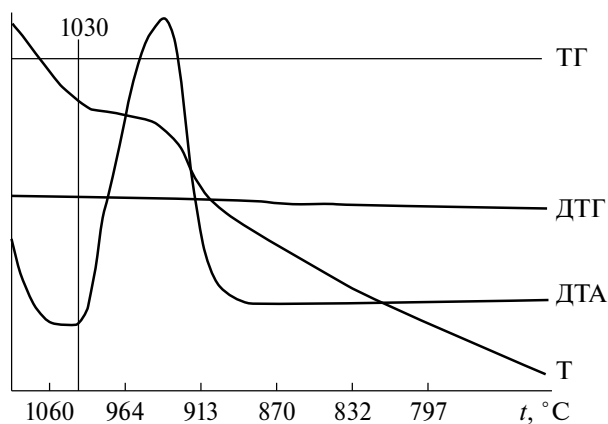
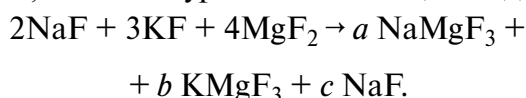


Рис. 4. Результаты термического анализа при охлаждении образца состава 33.3% NaF + 66.7% MgF<sub>2</sub>.

Таблица 2. Данные по двухкомпонентным системам [19, 24]

Система	Нонвариантная точка, температура плавления и состав смеси (экв.%)	Твердые фазы	Фазовая реакция
NaF–KF	$e_1$ 714°C, 40% NaF + 60% KF	NaF, $\alpha$ (ОТР на основе KF с содержанием 5% NaF)	$ж \rightleftharpoons NaF + \alpha$
NaF–MgF <sub>2</sub>	$e_2$ 824°C, 63.1% NaF + 36.9% MgF <sub>2</sub>	NaF, NaMgF <sub>3</sub>	$ж \rightleftharpoons NaF + NaMgF_3$
	$D_1$ 1023°C 33.4% NaF + 66.6 MgF <sub>2</sub>	NaMgF <sub>3</sub>	$ж \rightleftharpoons NaMgF_3$
	$e_3$ 994°C, 22.2% NaF + 77.8% MgF <sub>2</sub>	NaMgF <sub>3</sub> , MgF <sub>2</sub>	$ж \rightleftharpoons MgF_2 + NaMgF_3$
KF–MgF <sub>2</sub>	$e_4$ 785°C, 78.3% KF + 21.7% MgF <sub>2</sub>	KF, K <sub>2</sub> MgF <sub>4</sub>	$ж \rightleftharpoons KF + K_2MgF_4$
	$p$ 872°C, 64.1% KF + 35.9% MgF <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> MgF <sub>4</sub> , KMgF <sub>3</sub>	$ж + KMgF_3 \rightleftharpoons K_2MgF_4$
	$D_2$ 1090°C, 33.3% KF + 66.7% MgF <sub>2</sub>	KMgF <sub>3</sub>	$ж \rightleftharpoons KMgF_3$
	$e_5$ 1028°C, 10.4% KF + 89.6% MgF <sub>2</sub>	KMgF <sub>3</sub> , MgF <sub>2</sub>	$ж \rightleftharpoons MgF_2 + KMgF_3$
NaF–KF–MgF <sub>2</sub>	$E_1$ 975°C, 69.7% MgF <sub>2</sub> +21.5% NaF+ 8.8% KF	MgF <sub>2</sub> , KMgF <sub>3</sub> , NaMgF <sub>3</sub>	$ж \rightleftharpoons MgF_2 + KMgF_3 + NaMgF_3$
	$E_2$ 798°C, 36.7% MgF <sub>2</sub> +51.0% NaF+ 12.3% KF	NaF, KMgF <sub>3</sub> , NaMgF <sub>3</sub>	$ж \rightleftharpoons NaF + KMgF_3 + NaMgF_3$
	$E_3$ 685°C, 12.2% MgF <sub>2</sub> +32.4% NaF+ 55.4% KF	NaF, KF, K <sub>2</sub> MgF <sub>4</sub>	$ж \rightleftharpoons NaF + \alpha + K_2MgF_4$
	$P$ 710°C, 19.8% MgF <sub>2</sub> +35.1% NaF+ 45.1% KF	NaF, K <sub>2</sub> MgF <sub>4</sub> , KMgF <sub>3</sub>	$ж + KMgF_3 = NaF + K_2MgF_4$

Рассмотрим симплекс NaMgF<sub>3</sub>–KMgF<sub>3</sub>–NaF, запишем уравнение в общем виде:

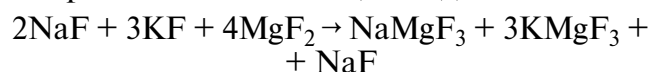


Определим коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  из системы уравнений

$$\begin{cases} c + a = 2 = Na^+ \\ b = 3 = K^+ \\ a + b = 4 = Mg^{2+} \end{cases}$$

$$a = 1, b = 3, c = 1.$$

Уравнение имеет общий вид:



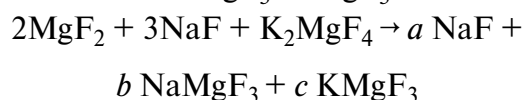
$$(\Delta_r H^\circ_{298} = -16.689 \text{ кДж};$$

$$\Delta_r G^\circ_{298} = -21.800 \text{ кДж}),$$

$$(\Delta_r H^\circ_{800} = 0 \text{ кДж}; \Delta_r G^\circ_{800} = 0 \text{ кДж}).$$

Состав после расплавления и кристаллизации принадлежит симплексу NaMgF<sub>3</sub>–KMgF<sub>3</sub>–NaF.

2. Возьмем еще три соли 2MgF<sub>2</sub> + 3NaF + K<sub>2</sub>MgF<sub>4</sub> и запишем общее уравнение для симплекса NaFKMgF<sub>3</sub>–NaMgF<sub>3</sub>:



$$\begin{cases} a + b = 3 = Na^+ \\ c = 2 = K^+ \\ b + c = 4 = Mg^{2+} \end{cases}$$

$$c = 2, b = 1, a = 2.$$

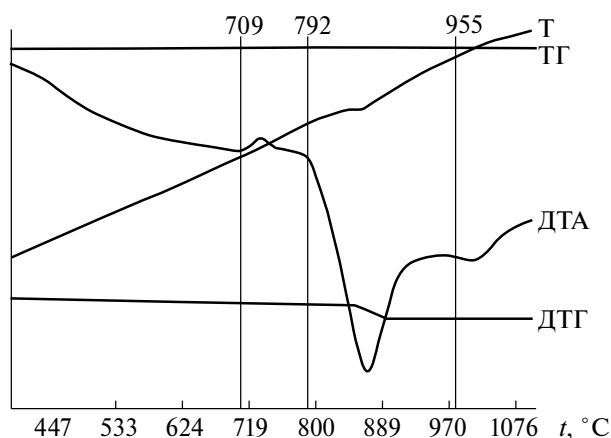


Рис. 5. Результаты термического анализа при нагреве образца состава 25% KF + 75% NaMgF<sub>3</sub>.

Все коэффициенты положительные, поэтому уравнение в общем виде запишем так:  
 $2\text{MgF}_2 + 3\text{NaF} + \text{K}_2\text{MgF}_4 \rightarrow 2\text{NaF} + \text{NaMgF}_3 + 2\text{KMgF}_3$

$$(\Delta_r H^\circ_{298} = -16,691 \text{ кДж};$$

$$\Delta_r G^\circ_{298} = -21,800 \text{ кДж}),$$

$$(\Delta_r H^\circ_{800} = 0 \text{ кДж}; \Delta_r G^\circ_{800} = 0 \text{ кДж}).$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование образцов следующих составов: 33.3% NaF + 66.7% MgF<sub>2</sub> (соединение конгруэнтного плавления NaMgF<sub>3</sub>), 25% KF + 75% NaMgF<sub>3</sub> (точка эквивалентности K<sub>2</sub>). Результаты термического анализа при нагреве и охлаждении данных составов приведены на рис. 3–6.

На ДТА-кривой нагрева образца состава 33.3% NaF + 66.7% MgF<sub>2</sub> (рис. 3) наблюдается экзоэффект при температуре 770°C, соответствующей температуре начала реакции образования химического соединения:  $\text{NaF} + \text{MgF}_2 = \text{NaMgF}_3$ . Далее следует эндоэффект при температуре 1029°C, которая соответствует температуре ликвидуса. Потеря массы образца незначительна и составляет 0.2%. На ДТА-кривой охлаждения образца состава 33.3% NaF + 66.7% MgF<sub>2</sub> (рис. 4) наблюдается один большой экзоэффект, соответствующий температуре кристаллизации соединения конгруэнтного плавления NaMgF<sub>3</sub>. Таким образом, экспериментально

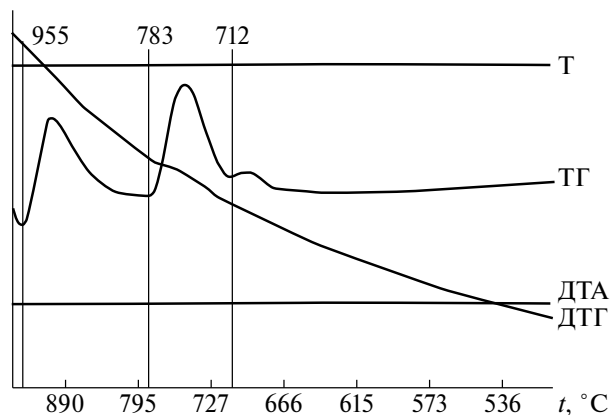


Рис. 6. Результаты термического анализа при охлаждении образца состава 25% KF + 75% NaMgF<sub>3</sub>.

доказано, что в системе NaFMgF<sub>2</sub> происходит образование соединения конгруэнтного плавления с дистектикой при 1029°C, что подтверждает данные [20].

На рис. 5 приведена ДТА-кривая нагрева образца состава 25% KF + 75% NaMgF<sub>3</sub>. Первый экзоэффект при 709°C соответствует появлению жидкой фазы за счет контактного плавления и начала химической реакции  $\text{KF} + \text{NaMgF}_3 = \text{NaF} + \text{KMgF}_3$  [24]. Далее прослеживаются два эндоэффекта: первый при 792°C отвечает температуре плавления, близкой к температуре плавления тройной эвтектики в симплексе NaMgF<sub>3</sub>–KMgF<sub>3</sub>–NaF, второй при 955°C отвечает температуре ликвидуса. Потеря массы составила 1.23%.

На ДТА-кривой охлаждения (рис. 6) образца состава 25% KF + 75% NaMgF<sub>3</sub> наблюдается следующая картина: первый экзоэффект при 955°C отвечает температуре ликвидуса, второй при 783°C – температуре плавления состава, отвечающего перевальной точке e<sub>6</sub> на моновариантной кривой E<sub>2</sub>P, третий при 712°C – температуре плавления, близкой к температуре плавления тройной перитектики в симплексе KF–K<sub>2</sub>MgF<sub>4</sub>–NaF.

Исходя из данных расчета не все реакции для смесей в точках эквивалентности и произвольно выбранных составов реализуются.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В трехкомпонентной системе NaF–KF–MgF<sub>2</sub> проведено разбиение на симплексы геометрическим методом, на основании которого спрогнозированы количество и со-

**Таблица 3.** Прогноз кристаллизующихся фаз в секущих и стабильных элементах системы NaF–KF–MgF<sub>2</sub>

Стабильная секущая	Фазы	Стабильный треугольник	Фазы
NaMgF <sub>3</sub> –KMgF <sub>3</sub>	NaMgF <sub>3</sub> , KMgF <sub>3</sub>	MgF <sub>2</sub> NaMgF <sub>3</sub> –KMgF <sub>3</sub>	MgF <sub>2</sub> , NaMgF <sub>3</sub> , KMgF <sub>3</sub>
KMgF <sub>3</sub> NaF	KMgF <sub>3</sub> , NaF	NaMgF <sub>3</sub> –KMgF <sub>3</sub> NaF	NaMgF <sub>3</sub> , KMgF <sub>3</sub> , NaF
K <sub>2</sub> MgF <sub>4</sub> NaF	K <sub>2</sub> MgF <sub>4</sub> , NaF	KMgF <sub>3</sub> NaFK <sub>2</sub> MgF <sub>4</sub>	KMgF <sub>3</sub> , NaF, K <sub>2</sub> MgF <sub>4</sub>
		KFNaFK <sub>2</sub> MgF <sub>4</sub>	α, NaF, K <sub>2</sub> MgF <sub>4</sub>

ставы кристаллизующихся фаз. Описание химического взаимодействия провели для точек эквивалентности, т.е. точек пересечения стабильных и нестабильных секущих, и методом ионного баланса для любых составов системы с учетом термодинамических данных по индивидуальным веществам и соединениям.

Описаны реакции химического взаимодействия для исходных составов из трех соединений. Как показывают термодинамические расчеты, при стандартных условиях реализуются не все возможные реакции.

Экспериментальные исследования, проведенные методом термического анализа, подтверждают фазовый комплекс системы, экзотермический характер образования соединения NaMgF<sub>3</sub> и эндотермический характер реакции смеси в точке K<sub>2</sub>.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролова Е.А., Кондаков Д.Ф., Данилов В.П. Фазовые равновесия в разрезах системы ацетат калия–этиленгликоль–вода при температурах 0...–66°C // Журн. неорган. химии. 2022. Т. 67. № 8. С. 1172–1174. <https://doi.org/10.31857/S0044457X22080116>
2. Фролова Е.А., Кондаков Д.Ф., Кириленко И.А. и др. Исследование фазовых равновесий в разрезах системы нитрат кальция–изопропанол–вода при температурах 0...–39°C // Журн. неорган. химии. 2023. Т. 68. № 10. С. 1491–1494. <https://doi.org/10.31857/S0044457X23600494>
3. Елохов А.М. Фазовые равновесия в системе перхлорат натрия–оксиэтилированный алкиламин–вода в интервале температур 58–90°C // Журн. неорган. химии. 2023. Т. 68. № 12. С. 1805–1810. <https://doi.org/10.31857/S0044457X22601195>
4. Елохов А.М., Кудряшова О.С., Лукманова Л.М. и др. Фазовые равновесия в системах нитрат или хлорид щелочноземельного металла–формиат натрия–вода // Журн. неорган. химии. 2022. Т. 67. № 12. С. 1810–1817. <https://doi.org/10.31857/S0044457X2210035X>
5. Солонина И.А., Макаев С.В., Родникова М. и др. Низкотемпературные фазовые равновесия в системе этиленгликоль–ацетон // Журн. физ. химии. 2023. Т. 97. № 2. С. 210–215. <https://doi.org/10.31857/S0044453723020267>
6. Морозов С.А., Яковлев И.Г., Гаркушин И.К. и др. Фазовые равновесия в двухкомпонентной системе дифенил–н–тетракозан // Журн. физ. химии. 2022. Т. 96. № 5. С. 628–633. <https://doi.org/10.31857/S0044453722050223>
7. Смирнова М.Н., Копьева М.А., Нипан Г.Д. и др. Фазообразование в системе MgO–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> // Журн. неорган. химии. 2022. Т. 67. № 11. С. 1638–1645. <https://doi.org/10.31857/S0044457X22600591>
8. Зайцева Н.А., Самигуллина Р.Ф., Иванова И.В. и др. Фазовые равновесия и химические взаимодействия в системах Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–ZnO–SiO<sub>2</sub>, Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>–ZnO–SiO<sub>2</sub> и MnO–ZnO–SiO<sub>2</sub> // Журн. неорган. химии. 2023. Т. 68. № 12. С. 1779–1785. <https://doi.org/10.31857/S0044457X23601347>
9. Дибиров Я.А., Искендеров Э.Г., Исаков С.И. Фазовые равновесия в системе CaMoO<sub>4</sub>–CaSO<sub>4</sub>–CaF<sub>2</sub>–CaCl<sub>2</sub> // Неорган. материа-

- лы. 2023. Т. 59. № 5. С. 515–520. <https://doi.org/10.31857/S0002337X23050020>
10. *Гаркушин И.К., Матвеев А.А., Сухаренко М.А.* Фазовые равновесия в стабильном треугольнике  $\text{NaF}-\text{Na}_3\text{ClMoO}_4-\text{Na}_3\text{ClWO}_4$  четырехкомпонентной системы  $\text{NaF}-\text{NaCl}-\text{Na}_2\text{MoO}_4-\text{Na}_2\text{WO}_4$  // Журн. неорганической химии. 2023. Т. 68. № 12. С. 1792–1798. <https://doi.org/10.31857/S0044457X23700253>
11. *Кожевникова Н.М.* Фазообразование в системе  $\text{Li}_2\text{MoO}_4-\text{BaMoO}_4-\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$  и свойства люминофора  $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{Gd}_3(\text{MoO}_4)_8:\text{Er}^{3+}$  // Неорганические материалы. 2023. Т. 59. № 1. С. 100–106. <https://doi.org/10.31857/S0002337X23010128>
12. *Харченко А.В., Егорова Е.М., Гаркушин И. и др.* Фазовый комплекс и химическое взаимодействие в трехкомпонентной взаимной системе  $\text{Li}^+, \text{Rb}^+ \parallel \text{Br}^-, \text{CrO}_4^{2-}$  // Неорганические материалы. 2022. Т. 58. № 11. С. 1219–1230. <https://doi.org/10.31857/S0002337X22110082>
13. *Егорова А.С., Сухаренко М.А., Кондратюк И.М. и др.* Древо фаз пятикомпонентной взаимной системы  $\text{Li}^+, \text{K}^+ \parallel \text{F}^-, \text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{CrO}_4^{2-}$  и исследование стабильного тетраэдра  $\text{LiF}-\text{Li}_2\text{CrO}_4-\text{KCl}-\text{KBr}$  // Неорганические материалы. 2023. Т. 59. № 8. С. 904–910. <https://doi.org/10.31857/S0002337X23080043>
14. *Бурчаков А.В., Мякинкова О.Н., Умарова А.С. и др.* Моделирование фазового комплекса стабильного тетраэдра  $\text{LiF}-\text{Li}_2\text{CrO}_4-\text{LiRbCrO}_4-\text{LiKCrO}_4$  четырехкомпонентной взаимной системы  $\text{Li}^+, \text{K}^+, \text{Rb}^+ \parallel \text{F}^-, \text{CrO}_4^{2-}$  // Журн. неорганической химии. 2023. Т. 68. № 4. С. 517–528. <https://doi.org/10.31857/S0044457X22601912>
15. *Хвостиков В.П., Хвостикова О.А., Потапович Н.С. и др.* Исследование фазовых равновесий в системе  $\text{Al}-\text{Ga}-\text{As}-\text{Bi}$  при  $900^\circ\text{C}$  // Неорганические материалы. 2023. Т. 59. № 7. С. 721–725. <https://doi.org/10.31857/S0002337X23070084>
16. *Восков А.Л., Ковалев И.А., Кочанов Г.П. и др.* Термодинамическое моделирование фазовых равновесий в системе  $\text{Nb}-\text{Zr}-\text{N}$  // Неорганические материалы. 2022. Т. 58. № 5. С. 530–537. <https://doi.org/10.31857/S0002337X22050116>
17. *Федоров П.П., Попов А.А., Шубин Ю.В. и др.* Фазовая диаграмма системы никель–платина // Журн. неорганической химии. 2022. Т. 67. № 12. С. 1805–1809. <https://doi.org/10.31857/S0044457X22600748>
18. *Баженова И.А., Шакирова Ю.Д., Хван А.В. и др.* Экспериментальное исследование фазовых равновесий в системе железо–гольмий // Журн. физ. химии. 2022. Т. 67. № 12. С. 1717–1723. <https://doi.org/10.31857/S0044453722120056>
19. *Воскресенская Н.К., Евсеева Н.Н., Беруль С.И.* Справочник по плавкости систем из безводных неорганических солей. Т. II. Системы тройные, тройные взаимные и более сложные. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 585 с.
20. Термические константы веществ. Вып. X. Ч.1. Таблицы принятых значений: Li, Na / Под ред. В.П. Глушко. М., 1981. 299 с.
21. Термические константы веществ. Вып. X. Ч. 2. Таблицы принятых значений: K, Rb, Cs, Fr. / Под ред. В.П. Глушко. М., 1981. 440 с.
22. Термические константы веществ. Вып. IX. Таблицы принятых значений: Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra / Под ред. В.П. Глушко. М., 1979. 574 с.
23. *Varin I., Platzki G.* Thermochemical Data of Pure Substances. Weinheim: VCH, 1995. 3rd Ed. 1885 p.
24. Диаграммы плавкости солевых систем. Ч. II / Под ред. Посыпайко В.И., Алексеевой Е.А. М.: Металлургия, 1977. 304 с.