



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2025. Т. 25, вып. 3. С. 287–293

Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology, 2025, vol. 25, iss. 3, pp. 287–293

<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-3-287-293>, EDN: IOVUMQ

Научная статья

УДК 544.01+544.971+544.013



Моделирование химического взаимодействия в тройной взаимной системе $K^+, Cd^{2+} \parallel F^-, Cl^-$

И. К. Гаркушин , О. В. Лаврентьева, А. И. Замалдинова, М. А. Истомова

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», olav1965olga@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8110-2495>

Замалдинова Алена Игоревна, студент, alenazamzam@yandex.ru

Истомова Мария Александровна, кандидат химических наук, доцент кафедры «Общая и неорганическая химия», mariaistomova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2210-2046>

Аннотация. Вещества, составляющие трехкомпонентную взаимную систему из фторидов и хлоридов калия и кадмия, имеют различное применение как в индивидуальном виде, так и в смесях. Ограничивающие элементы тройной взаимной системы включают в двойных системах образование соединений $KF\text{-}CdF_2$, $KCl\text{-}CdCl_2$ конгруэнтного и соединения $4KCl\text{-}CdCl_2$ инконгруэнтного плавления. С учетом соединений построено древо кристаллизации, имеющее линейное строение и включающее пять стабильных вторичных треугольников, разделяющихся между собой четырьмя стабильными секущими, из которых три секущих имеют квазибинарный характер. Древо кристаллизации позволяет осуществить прогноз кристаллизующихся фаз во вторичных фазовых треугольниках. В четырех вторичных фазовых треугольниках отмечено образование тройных точек нонвариантных четырехфазных равновесий. Вторичный фазовый треугольник $KCl\text{-}K_4CdCl_6\text{-}KCdF_3$ не содержит нонвариантной точки. Система из фторидов и хлоридов калия и кадмия относится к адиагональному типу разбиения. Описано химическое взаимодействие при стандартных условиях. Моделирование химического взаимодействия для фигуративных точек состава, отвечающих пересечениям стабильных и нестабильных секущих, проведено по термодинамическим данным исходных веществ и двойных соединений. На двух стабильных секущих отмечено образование по три точки эквивалентности. На остальных двух стабильных секущих отмечено по две точки эквивалентности. Согласно термодинамическим расчетам для двух смесей из десяти при стандартных условиях реакции не могут быть реализованы. Предложенная методика описания химического взаимодействия может быть использована для других типов тройных взаимных систем с реакциями обмена как с адиагональным, так и с диагональным типом разбиения. Смеси, отвечающие точкам эквивалентности на нестабильных секущих, с тепловым эффектом реакций более 50 кДж, можно использовать как экзотермические одноразового действия.

Ключевые слова: тройная взаимная система, фториды, хлориды, моделирование, стабильные и нестабильные секущие, двойные соединения

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

Для цитирования: Гаркушин И. К., Лаврентьева О. В., Замалдинова А. И., Истомова М. А. Моделирование химического взаимодействия в тройной взаимной системе $K^+, Cd^{2+} \parallel F^-, Cl^-$ // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2025. Т. 25, вып. 3. С. 287–293. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-3-287-293>, EDN: IOVUMQ

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

Article

Modeling of chemical interaction in the ternary reciprocal system $K^+, Cd^{2+} \parallel F^-, Cl^-$

I. K. Garkushin , O. V. Lavrenteva, A. I. Zamaldinova, M. A. Istomova

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, olav1965olga@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8110-2495>

Alena I. Zamaldinova, zamaldinovaa@yandex.ru

Mariya A. Istomova, mariaistomova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2210-2046>

Abstract. The substances that make up the three-component reciprocal system of fluorides and chlorides of potassium and cadmium have various applications, both individually and in mixtures. The faceting elements of the ternary reciprocal system include in binary systems the formation of compounds $KF\cdot CdF_2$, $KCl\cdot CdCl_2$ of congruent and compound $4KCl\cdot CdCl_2$ of incongruent melting. The crystallization tree is constructed. Taking into account the compounds, a crystallization tree has been constructed that has a linear structure and includes five stable secondary triangles. The triangles are separated from each other by four stable secants, of which three secants have a quasi-binary character. The crystallization tree allows one to predict crystallizing phases in secondary phase triangles. In four secondary phase triangles, the formation of triple points of invariant four-phase equilibria is noted. The secondary phase triangle $KCl\cdot K_4CdCl_6\cdot KCdF_3$ does not contain an invariant point. The system of fluorides and chlorides of potassium and cadmium belongs to the adiagonal triangulate type. Chemical interaction under standard conditions is described. Modeling of chemical interaction for figurative points of composition corresponding to intersections of stable and unstable secants has been carried out using thermodynamic data of the starting materials and binary compounds. The formation of three equivalence points is noted on two stable secants. On the other two stable secants, two equivalence points are noted. According to thermodynamic calculations, for two mixtures out of ten, reactions cannot be realized under standard conditions. The proposed technique for describing chemical interactions can be used for other types of ternary reciprocal systems with exchange reactions with both diagonal and diagonal types of partitioning. Mixtures corresponding to equivalence points on unstable secants with a heat effect of reactions greater than 50 kJ can be used as single-action exothermic mixtures.

Keywords: ternary reciprocal system, fluorides, chlorides, modeling, stable and unstable secants, binary compounds

Acknowledgments. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FSSE-2023-0003) as part of the state task of the Samara State Technical University.

For citation: Garkushin I. K., Lavrenteva O. V., Zamaldinova A. I., Istomova M. A. Modeling of chemical interaction in the ternary reciprocal system $K^+, Cd^{2+} \parallel F^-, Cl^-$. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2025, vol. 25, iss. 3, pp. 287–293 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-3-287-293>, EDN: IOVUMQ

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

Введение

Компоненты системы интересны тем, что они имеют разнообразное применение как индивидуальные вещества, так и в смесях. Фторид калия входит в качестве добавки в нанокомпозитный люминофор, который излучает белый свет высокой яркости при возбуждении с помощью диодного лазера [1], применяется в качестве компонента боратного стекла, используемого в фотонных устройствах [2], тонкопленочных солнечных элементов [3]. Фторидом калия пропитывают наночастицы природного цеолита для получения нового гетерогенного катализатора для синтеза бензодиазепинов [4]. Также фторид калия применяется в качестве флюса [5, 6], как реагент при фторировании органических соединений. Гидрофториды калия используют в качестве электролитов при получении фтора [5].

Хлорид калия применяется в металлургии, пиротехнике, фотографии, а также в текстильной, стекольной, мыловаренной, фармацевтической, целлюлозно-бумажной, кожевенной и многих других отраслях промышленности [7], для производства гидроксида калия методом электролиза. При ремонте скважин раствор хлорида калия используют в качестве бурового раствора. На кристаллах хлорида калия возможно формирование голограмм [8]. Хлорид калия – основное калийное удобрение практически во всем мире [9].

Фторид кадмия применяется в качестве оптического материала. Как компонент стекол, люминофоров, лазерных материалов, твердых электролитов в химических источниках тока [10]. Изучаются магнитные и голограммические свойства наноструктур и кристаллов фторида кадмия [11]. Хлорид кадмия является компонентом гальванических элементов, применяется как протрава при крашении и печатании тканей, в качестве компонента сорбентов для газовой хроматографии, катализаторов органического синтеза, флюсов для выращивания полупроводниковых кристаллов и исходное вещество для получения кадмийорганических соединений [10].

Смеси фторидов и хлоридов s^1 - и других элементов используются при создании флюсов для сварки и пайки металлов [5], в качестве растворителей неорганических солей, сред для электролитического выделения металлов и расплавляемых электролитов химических источников тока [12–14], в процессах аккумулирования тепловой энергии [15–17].

Получение новых материалов и композиций и их применение в большинстве своем основано на данных о фазовых диаграммах и физико-химическом взаимодействии в расплавах.

Целью данной работы является построение древа фаз и термодинамическое моделирование химического взаимодействия в тройной взаимной системе $K^+, Cd^{2+} \parallel F^-, Cl^-$.

Методы и материалы

Ранее проведен термодинамический анализ химического взаимодействия в тройных оксидных системах $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{MgO}$ и солевой системе $\text{KCl}-\text{CaCl}_2-\text{BaCl}_2$ в работах [18–20]. Тройная взаимная система $\text{K}^+,\text{Cd}^{2+} \parallel \text{F}^-, \text{Cl}^-$ исследована ранее в работе [21]. Она включает в элементах ограничения три двойных соединения. Термические и термодинамические свойства, взятые

для расчетов, приняты по данным [22, 23] (табл. 1). Вначале на квадрат состава нанесены все исходные вещества, двойные соединения, стабильные и нестабильные секущие (рис. 1). Концентрации соединений выражены в молярных концентрациях эквивалентов веществ. На основе данных [21] построено древо кристаллизации (рис. 2), включающее пять стабильных вторичных треугольников, разделяющихся между собой четырьмя стабильными секущими.

Таблица 1 / Table 1

Термодинамические свойства исходных веществ, двойных и тройного соединения системы

$\text{K}^+,\text{Cd}^{2+} \parallel \text{F}^-, \text{Cl}^-$ [22, 23]

Thermodynamic properties of mother substances, binary and ternary compounds $\text{K}^+,\text{Cd}^{2+} \parallel \text{F}^-, \text{Cl}^-$ [22, 23]

№	Вещество / Substance	Температура плавления, °C / Melting temperature, °C	Энталпия образования $\Delta_f H_{298}^0$, кДж/моль / Enthalpy of formation $\Delta_f H_{298}^0$, kJ/mol	Энергия Гиббса $\Delta_f G_{298}^0$, кДж/моль / Gibbs energy $\Delta_f G_{298}^0$, kJ/mol
1	KCl	771.0	-436.558	-408.642
2	KF	858.0	-566.095	-536.426
3	CdF_2	1072.0	-700.401	-649.482
4	CdCl_2	568.5	-390.785	-343.242
5	KCdF_3	949.0	-1266.496	-1175.908
6	KCdCl_3	428.0	-844.749	-751.884
7	K_4CdCl_6	462.0	-2137.017	-1977.810

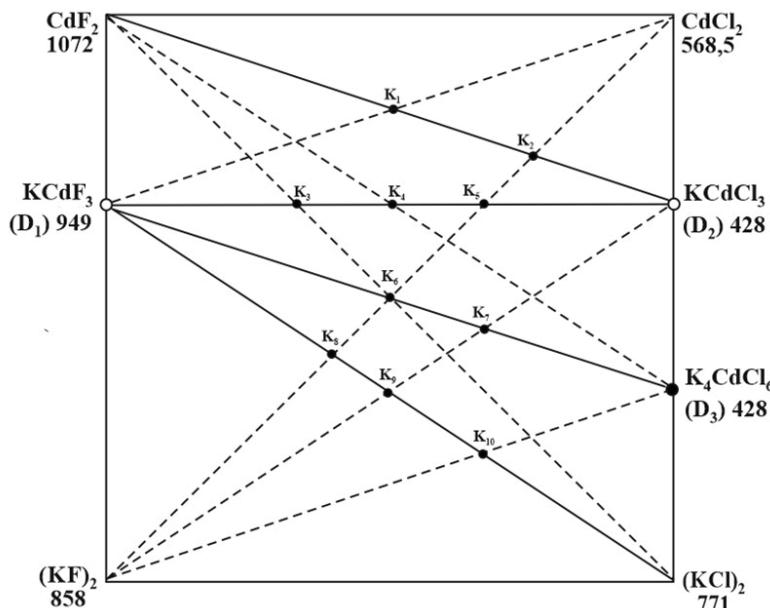


Рис. 1. Расположение точек эквивалентности при пересечении стабильных и нестабильных секущих (составы – в эквивалентных долях): \circ – соединение конгруэнтного плавления; \bullet – соединение инконгруэнтного плавления; \bullet – точки пересечения стабильных и нестабильных секущих

Fig. 1. The location of equivalence points at the intersection of stable and unstable secants (compositions – in equivalent proportions): \circ – congruent melting compounds; \bullet – incongruent melting compounds; \bullet – intersection points of stable and unstable secants

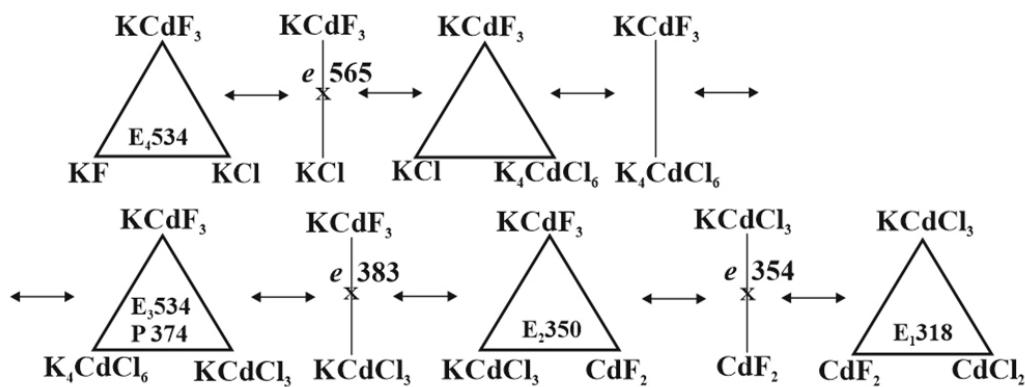


Рис. 2. Древо кристаллизации системы $\text{K}^+, \text{Cd}^{2+} \parallel \text{F}^-, \text{Cl}^-$
Fig. 2. Crystallization tree of system $\text{K}^+, \text{Cd}^{2+} \parallel \text{F}^-, \text{Cl}^-$

Для описания химического взаимодействия необходимо в соответствии с законом эквивалентов [24] использовать смеси, отвечающие точкам эквивалентности, т.е. точкам пересечения стабильных и нестабильных секущих во взаимных системах [25–28].

Как видно из рис. 1, четырем стабильным секущим отвечает шесть нестабильных секущих, которые пересекаются в 10 точках эквивалентности.

Экспериментально-расчетная часть

Стабильные и нестабильные секущие пересекаются в 10 точках эквивалентности (см. рис. 1, табл. 2), для которых описано химическое взаимодействие и проведен расчет тепловых эффектов и энергий Гиббса для стандартных условий.

В табл. 2 приведены уравнения реакций, тепловые эффекты и энергии Гиббса реакций обмена при стандартных условиях для смесей, отвечающих точкам эквивалентности.

Таблица 2 / Table 2

Уравнения реакций, тепловые эффекты и энергии Гиббса для стандартных условий
в точках эквивалентности
Reaction equations, heat effects and Gibbs energies for standard conditions at equivalence points

Точка	Уравнение реакции (точка на рис. 1) / Reaction equation (point in Fig. 1)	Тепловой эффект реакций $\Delta_f H_{298}^0$, кДж / Heat effects of reaction $\Delta_f H_{298}^0$, kJ	Энергия Гиббса реакций $\Delta_f G_{298}^0$, кДж / Gibbs energy of reaction $\Delta_f G_{298}^0$, kJ
K_1	$2\text{KCdF}_3 + 3\text{CdCl}_2 = 3\text{CdF}_2 + 2\text{KCdCl}_3$	-55.354	-70.872
K_2	$2\text{KF} + 3\text{CdCl}_2 = \text{CdF}_2 + 2\text{KCdCl}_3$	-85.354	-70.672
K_3	$3\text{CdF}_2 + 3\text{KCl} = 2\text{KCdF}_3 + \text{KCdCl}_3$	33.136	100.872
K_4	$3\text{CdF}_2 + \text{K}_4\text{CdCl}_6 = 2\text{KCdF}_3 + 2\text{KCdCl}_3$	15.730	70.872
K_5	$3\text{KF} + 3\text{CdCl}_2 = \text{KCdF}_3 + 2\text{KCdCl}_3$	-85.354	-70.662
K_6	$6\text{KF} + 3\text{CdCl}_2 = 2\text{KCdF}_3 + \text{K}_4\text{CdCl}_6$	-101.084	-141.144
K_7	$3\text{KF} + 2\text{KCdCl}_3 = \text{KCdF}_3 + \text{K}_4\text{CdCl}_6$	-15.730	-70.672
K_8	$3\text{KF} + \text{CdCl}_2 = \text{KCdF}_3 + 2\text{KCl}$	-50.542	-70.672
K_9	$3\text{KF} + \text{KCdCl}_3 = \text{KCdF}_3 + 3\text{KCl}$	-33.136	-70.667
K_{10}	$3\text{KF} + \text{K}_4\text{CdCl}_6 = \text{KCdF}_3 + 6\text{KCl}$	-50.542	-70.672

Как видно из табл. 2, только для реакций смесей в точках эквивалентности K_3 и K_4 тепловые эффекты реакций и энергии Гиббса

больше нуля для стандартных условий. Кристаллизующиеся фазы приведены в правой части уравнений.



Результаты и их обсуждение

Система $K^+, Cd^{2+} \parallel F^-, Cl^-$ относится к адиагональному типу, т.е. отсутствует стабильная диагональ. В системе образуется три двойных соединения $KCdF_3$, $KCdCl_3$ и K_4CdCl_6 , которые позволили разбить квадрат состава и построить древо кристаллизации. Древо кристаллизации имеет линейное строение и включает пять вторичных фазовых треугольников, соединя-

ющихся между собой четырьмя стабильными секущими. Три из четырех стабильных секущих имеют квазибинарный характер. Древо кристаллизации позволяет провести анализ кристаллизующихся фаз для различных интервалов концентраций смесей на нестабильных секущих (табл. 3).

Как видно из табл. 3, для всех интервалов концентраций на нестабильных секущих кристаллизуются три фазы.

Таблица 3 / Table 3

Кристаллизующиеся фазы для участков нестабильных диагоналей Crystallizing phases for unstable diagonal sections

Интервал концентраций на нестабильных секущих / Concentration range on unstable secants	Прогноз кристаллизующихся фаз / Forecast of crystallizing phases
$KF-K_8$, $KF-K_9$, $KF-K_{10}$	$KF+KCl+KCdF_3$
K_8-K_6 , K_9-K_7 , $K_{10}-K_4CdCl_6$, K_6-KCl	$KCdF_3+KCl+K_4CdCl_6$
K_6-K_3 , K_6-K_5 , $K_7-KCdCl_3$, $K_4-K_4CdCl_6$	$KCdF_3+K_4CdCl_6+KCdCl_3$
K_5-K_2 , CdF_2-K_4 , CdF_2-K_3 , $KCdF_3-K_1$	$KCdF_3+KCdCl_3+CdF_2$
K_1-CdCl_2 , K_2-CdCl_2	$CdF_2+CdCl_2+KCdCl_3$

Проведено термодинамическое моделирование реакций химического взаимодействия для смесей, отвечающих точкам пересечения стабильных и нестабильных секущих (точкам эквивалентности). Нестабильная секущая K $F-CdCl_2$ пересекает стабильные секущие в четырех точках эквивалентности. На стабильных секущих $KCdF_3-KCdCl_3$ и $KCdF_3-KCl$ образуются по три точки эквивалентности, на стабильных секущих $KCdF_3-K_4CdCl_6$ и $CdF_2-KCdCl_3$ – по две точки эквивалентности. Как показали расчеты стандартных значений энталпий и энергий Гиббса реакций обмена, некоторые реакции для смесей K_3 и K_4 не реализуются. Также следует учитывать последовательность образования фаз в случае пересечения стабильных секущих с нестабильными в нескольких точках эквивалентности и возможное влияние кинетики на взаимодействие.

Заключение

Смеси, отвечающие тепловым эффектам более 50 кДж, могут быть использованы в качестве одноразовых экзотермических. Смеси, отвечающие квазидвойным и тройным эвтек-

тикам [21], могут быть использованы в качестве теплоаккумулирующих или в качестве расплавляемых электролитов для химических источников тока.

Список литературы

1. *Xin M. White light KF-KYb₃F₁₀: Tm³⁺ nanocomposite upconversion phosphor synthesized by a hydrothermally treatment* // Opt. Mater. 2022. Vol. 127. Art. 112303. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112303>
2. *Belachew K., Laxmikanth C., Fekede L. Conversion of Mn²⁺ into Mn³⁺ in manganese ions doped KF-CaO-B₂O₃ glasses: Electrical and spectroscopic properties* // Physica B: Cond. Matter. 2022. Vol. 645. Art. 414225. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2022.414225>
3. *Eslam A., Wuerz R., Hauschild D., Weinhardt L. Impact of substrate temperature during NaF and KF post-deposition treatments on chemical and optoelectronic properties of alkali-free Cu(In, Ga)Se₂ thin film solar cell absorbers* // Thin Solid Films. 2021. Vol. 739. Art. 138979. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138979>
4. *Noushin A., Sayyed-Alangi S.Z., Varasteh-Moradi A., Hossaini Z. KF Impregnated Natrolite Zeolite as a New Heterogeneous Nanocatalyst Promoted One-Pot Synthesis of Benzo [1,4]-Diazepin-5-One Derivatives* // Polycyclic Aromat. Compd. 2021. Vol. 42, iss. 10. P. 1–16. <https://doi.org/10.1080/10406638.2021.2002377>
5. *Шретер В., Лаутенишлегер К.-Х., Бибрак Х., Шнабель А. Химия : Справочник. М. : Химия, 2000. 648 с.*

6. Пат. 2217272 Российская Федерация, (51) МПК B23K 1/19 (2000.01). Способ пайки алюминия и алюминиевых сплавов, флюс для пайки алюминия и алюминиевых сплавов (варианты) / Зезеке-Койро Ульрих (DE), Патентообладатель(и): Солвей Флуор Унд Деривате Гмбх (DE). № 2000126749/02 заявл: 23.03.1999; опубл. 27.11.2003, Бюл. № 33.
7. Муравин Э. А. Агрохимия : учеб. пособие. М. : Колос, 2003. 384 с.
8. Владимиров Д. А., Мандель В. Е., Попов А. Ю., Тюрин А. В. Оптимизация записи голограмм на аддитивно окрашенных кристаллах KCl // Оптика и спектроскопия. 2005. Т. 99, № 1. С. 147–150.
9. Кореньков Д. А. Удобрения, их свойства и способы использования. М. : Колос, 1982. 415 с.
10. Химическая энциклопедия : в 5 т. Т. 2 / редкол.: Куняинц И. Л. (гл. ред.) и др. М. : Сов. энцикл., 1990. 671 с.
11. Баграев Н. Т., Брилинская Е. С., Даниловский Э. Ю., Клячкин Л. Е., Маляренко А. М., Романов В. В. Магнитные свойства наноструктур фторида кадмия // Атомная физика, физика кластеров и наноструктур. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физ.-мат. науки. 2011. № 3. С. 38–45.
12. Коровин Н. В. Электрохимическая энергетика. М. : Энергоатомиздат, 1991. 264 с.
13. Делимарский Ю. К., Барчук Л. П. Прикладная химия ионных расплавов. Киев : Наукова думка, 1988. 192 с.
14. Баталов Н. Н. Высокотемпературная электрохимическая энергетика. Успехи и проблемы // Тезисы докладов XI конф. по физ. химии и электрохимии расплавленных твердых электролитов. Екатеринбург : Институт высокотемпературной электрохимии УО РАН, 1998. Т. 1. С. 3–4.
15. Аймбетова И. О., Сулейменов У. С., Камбаров М. А., Калшабекова Э. Н., Риставлетов Р. А. Теплофизические свойства фазопереходных теплоаккумулирующих материалов, применяемых в строительстве // Успехи современного естествознания. 2018. № 12, ч. 1. С. 9–13. <https://doi.org/10.17513/use.36966>
16. Чернеева Л. И., Родионова Е. К., Мартынова Н. М. Энталпии плавления солевых эвтектик. Обзоры по теплофизическими свойствам веществ. М. : ИВТАН, 1980. № 3 (23). 56 с.
17. Васина Н. А., Грызлова Е. С., Шапошникова С. Г. Теплофизические свойства многокомпонентных солевых систем. М. : Химия, 1984. 112 с.
18. Garkushin I. K., Lavrenteva O. V., Shterenberg A. M. Forecast of Crystallizing Phases and Description of the Chemical Interaction in the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-MgO}$ System // Glass Phys. Chem. 2021. Vol. 47. № 6. P. 622–629. <https://doi.org/10.1134/S1087659621060109>
19. Garkushin I. K., Lavrenteva O. V., Shterenberg A. M. Forecast of Crystallizing Phases and Modeling of Chemical Interaction in the System $\text{CaO}\text{-MgO}\text{-SiO}_2$ // Glass Phys. Chem. 2023. Vol. 49, № 2. P. 121–128. <http://dx.doi.org/10.1134/S1087659622601058>
20. Гаркушин И. К., Лаврентьева О. В. Описание химического взаимодействия в системе $\text{CaO}\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2023. Т. 23, вып. 2. С. 138–147. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-2-138-147>, EDN: KPYLJX
21. Посыпайко В. И., Алексеева Е. А. Диаграммы плавкости солевых систем. Тройные взаимные системы. М. : Химия, 1977. 325 с.
22. Термические константы веществ. Вып. IX / под ред. акад. В. П. Глушко. М. : ВИНИТИ, 1981. 574 с.
23. Термические константы веществ. Вып. X / под ред. акад. В. П. Глушко. М. : ВИНИТИ, 1981. 441 с.
24. Васильев В. П. Аналитическая химия : в 2 ч. Ч. 1. Гравиметрический и титриметрический методы анализа : учеб. для хим.-технол. спец. вузов. М. : Высш. шк., 1989. 320 с.
25. Сечной А. И., Гаркушин И. К., Трунин А. С. С. Дифференциация четырехкомпонентной системы из шести солей Na , K , $\text{Ca} \parallel \text{Cl}$, MoO_4 и схема описания химического взаимодействия // Журн. неорг. химии. 1988. Т. 33, № 3. С. 752–755.
26. Посыпайко В. И., Штер Г. Е., Васина Н. А. Практическое применение конверсионного метода анализа при исследовании пятикомпонентной взаимной системы из девяти солей Na , K , $\text{Ba} \parallel \text{F}$, MoO_4 , WO_4 // Докл. АН СССР. 1976. Т. 228, № 3. С. 613–618.
27. Посыпайко В. И., Тарасевич С. А., Алексеева Е. А. Прогнозирование химического взаимодействия в системах из многих компонентов. М. : Наука, 1984. 216 с.
28. Посыпайко В. И. Методы исследования многокомпонентных систем. М. : Наука, 1978. 255 с.

References

1. Xin M. White light $\text{KF-KYb}_3\text{F}_{10}$: Tm^{3+} nanocomposite upconversion phosphor synthesized by a hydrothermally treatment. *Opt. Mater.*, 2022, vol. 127, art. 112303. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112303>
2. Belachew K., Laxmikanth C., Fekede L. Conversion of Mn^{2+} into Mn^{3+} in manganese ions doped $\text{KF-CaO-B}_2\text{O}_3$ glasses: Electrical and spectroscopic properties. *Physica B: Cond. Matter.*, 2022, vol. 645, art. 414225. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2022.414225>
3. Eslam A., Wuerz R., Hauschild D., Weinhardt L. Impact of substrate temperature during NaF and KF post-deposition treatments on chemical and optoelectronic properties of alkali-free $\text{Cu}(\text{In, Ga})\text{Se}_2$ thin film solar cell absorbers. *Thin Solid Films*, 2021, vol. 739, art. 138979. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138979>
4. Noushin A., Sayyed-Alangi S. Z., Varasteh-Moradi A., Hossaini Z. KF Impregnated Natrolite Zeolite as a New Heterogeneous Nanocatalyst Promoted One-Pot Synthesis of Benzo [1,4]-Diazepin-5-One Derivatives. *Polycyclic Aromat. Compd.*, 2021, vol. 42, no. 10, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1080/10406638.2021.2002377>
5. Schröter W., Lautenschläger K.-H., Bibrak H., Schnabel A. *Khimiya: spravochnik* [Chemistry: A handbook]. Moscow, Khimiya, 2000. 648 p. (in Russian).

6. Pat. 2217272 Russian Federation, (51) IPC B23K 1/19 (2000.01). *Method for soldering aluminum and its alloys, flux for soldering aluminum and its alloys (variants)*. Zezeke-Kojo Ulrikh (DE), patent holder(s): Solvej Fluor and Derivate Gmbkh (DE), no. 2000126749/02 filed 23.03.1999, published 27.11.2003, Bulletin no. 33.
7. Muravin E. A. *Agrokhimiya: ucheb. posobiye* [Agrochemistry: Textbook]. Moscow, Kolos, 2003. 384 p. (in Russian).
8. Vladimirov D. A., Mandel V. E., Popov A. Y., Tyurin A. V. Optimization of the recording conditions for holograms recorded in additively colored KCl crystals. *Optics and Spectroscopy*, 2005, vol. 99, no. 1, pp. 137–140 (in Russian).
9. Korenkov D. A. *Udobreniya, ikh svoystva i sposoby ispol'zovaniya* [Fertilizers, their properties and methods of use]. Moscow, Kolos, 1982. 415 p. (in Russian).
10. Knunyants I. L., ed. *Khimicheskaya entsiklopediya: v 5 t.* [The chemical encyclopedia: in 5 vols]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya, 1990, vol. 2. 671 p. (in Russian).
11. Bagraev N. T., Brilinskaya E. S., Danilovsky E. Yu., Klyachkin L. E., Molyarenko A. M., Romanov V. V. Magnetic properties of cadmium fluoride nanostructures. *Atomic Physics, Physics of Clusters and Nanostructures. Scientific and Technical Statements of St. Petersburg State Polytechnical University. Phys. and Mathematics*, 2011, no. 3, pp. 38–45 (in Russian).
12. Korovin N. V. *Elektrokhimicheskaya energetika* [Electrochemical power engineering]. Moscow, Energoatomizdat, 1991. 264 p. (in Russian).
13. Delimarskij Yu. K., Barchuk L. P. *Prikladnaya khimiya ionnykh rasplavov* [Applied Chemistry of Ionic Melts]. Kiev, Naukova dumka, 1988. 192 p. (in Russian).
14. Batalov N. N. High-temperature electrochemical power engineering. Successes and challenges. *Theses of the reports of XI Conference by Physical Chemistry and Electrochemistry of Molten Solid Electrolytes*. Yekaterinburg, Institute of High Temperature Electrochemistry UrO RAN Publ., 1998, vol. 1, pp. 3–4 (in Russian).
15. Aymbetova I. O., Suleymanov U. S., Kambarov M. A., Kalshabekova E. N., Ristavletov R. A. Thermophysical properties of phase transparent heat-storing materials used in construction. *J. Advances in Current Natural Sciences*, 2018, no. 12, part 1, pp. 9–13 (in Russian). <https://doi.org/10.17513/use.36966>
16. Cherneeva L. I., Rodionova E. K., Martynova N. M. *Melting enthalpies of salt eutectics. Reviews on the thermophysical properties of substances*. Moscow, IVTAN, 1980, no. 3 (23). 56 p. (in Russian).
17. Vasina N. A., Gryzlova E. S., Shaposhnikova S. G. *Teplofizicheskie svoystva mnogokomponentnykh soleykh sistem* [Thermophysical properties of multicomponent salt systems]. Moscow, Khimiya, 1984. 112 p. (in Russian).
18. Garkushin I. K., Lavrenteva O. V., Shterenberg A. M. Forecast of crystallizing phases and description of the chemical interaction in the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-MgO}$ system. *Glass Phys. Chem.*, 2021, vol. 47, no. 6, pp. 622–629. <https://doi.org/10.1134/S1087659621060109>.
19. Garkushin I. K., Lavrenteva O. V., Shterenberg A. M. Forecast of crystallizing phases and modeling of chemical interaction in the system $\text{CaO}\text{-MgO}\text{-SiO}_2$. *Glass Phys. Chem.*, 2023, vol. 49, no. 2, pp. 121–128. <http://dx.doi.org/10.1134/S1087659622601058>.
20. Garkushin I. K., Lavrenteva O. V. Description of the chemical interaction in the system $\text{CaO}\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. *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
21. Posypayko V. I., Alekseeva E. A. *Diagrammy plavkosti soleykh sistem. Troynyye vzaimnyye sistemy* [Fusibility diagrams of salt systems. Ternary Reciprocal Systems]. Moscow, Khimiya, 1977. 325 p. (in Russian).
22. *Termicheskie konstanty veshchestv. Pod red. V. P. Glushko. Vyp. IX* [Glushko V. P., ed. Thermal constants of substances. Iss. IX]. Moscow, VINITI Publ., 1981. 574 p. (in Russian).
23. *Termicheskie konstanty veshchestv. Pod red. V. P. Glushko. Vyp. X* [Glushko V. P., ed. Thermal constants of substances. Iss. X]. Moscow, VINITI, 1981. 441 p. (in Russian).
24. Vasiliev V. P. *Analiticheskaya khimiya: v 2 ch. Ch. 1. Gravimetricheskiy i titrimetricheskiy metody analiza: ucheb. dlya khim.-tekhnol. spets. vuzov* [Analytical chemistry: in 2 parts. Part 1. Gravimetric and titrimetric methods of analysis: Textbook for chemical-technological specialty universities]. Moscow, Vysshaya shkola, 1989. 320 p. (in Russian).
25. Sechnoy A. I., Garkushin I. K., Trunin A. S. Differentiation of a four-component system of six salts $\text{Na, K, Ca} \parallel \text{Cl, MoO}_4$ and the scheme for the chemical interaction description. *Russ. J. of Inorg. Chem.*, 1988, vol. 33, no. 3, pp. 752–755 (in Russian).
26. Posypayko V. I., Shter G. E., Vasina N. A. Practical application of the conversion method of analysis in the study of a five-component reciprocal system of nine salts $\text{Na, K, Ba} \parallel \text{F, MoO}_4, \text{WO}_4$. *Report the USSR Academy of Sciences*, 1976, vol. 228, no. 3, pp. 613–618 (in Russian).
27. Posypayko V. I., Tarasevich S. A., Alekseeva E. A. *Prognozirovanie khimicheskogo vzaimodeistviya v sistemakh iz mnogikh komponentov* [Forecasting of chemical interaction in systems of many components]. Moscow, Nauka, 1984. 216 p. (in Russian).
28. Posypayko V. I. *Metody issledovaniya mnogokomponentnykh sistem* [Research methods for multicomponent systems]. Moscow, Nauka, 1978. 255 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 29.03.2025; одобрена после рецензирования 07.04.2025; принята к публикации 14.04.2025
The article was submitted 29.03.2025; approved after reviewing 07.04.2025; accepted for publication 14.04.2025