

УДК 541.123.6 + 549.76

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ РАВНОВЕСИЙ В СТАБИЛЬНОМ ТЕТРАЭДРЕ $\text{LiF-KCl-KBr-LiKCrO}_4$ ПЯТИКОМПОНЕНТНОЙ ВЗАИМНОЙ СИСТЕМЫ $\text{Li}^+, \text{K}^+ \parallel \text{F}^-, \text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{CrO}_4^{2-}$

© 2024 г. М. А. Сухаренко^{1, *}, И. С. Портнова¹, А. С. Егорова¹,
И. К. Гаркушин¹, И. М. Кондратюк²

¹Самарский государственный технический университет, ул. Молодогвардейская, 244, Самара, 443100 Россия

²Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики, пр. И. Шамиля, 39-а, Махачкала, 367030 Россия

*e-mail: sukharenko_maria@mail.ru

Поступила в редакцию 12.12.2023 г.

После доработки 25.03.2024 г.

Принята к публикации 26.03.2024 г.

Исследован стабильный тетраэдр $\text{LiF-KCl-KBr-LiKCrO}_4$ пятикомпонентной взаимной системы $\text{Li}^+, \text{K}^+ \parallel \text{F}^-, \text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{CrO}_4^{2-}$. Экспериментальные исследования, проведенные методом дифференциального термического анализа, показали, что в стабильном тетраэдре кристаллизуются три твердые фазы: LiF , LiKCrO_4 и $\text{KCl}_x\text{Br}_{1-x}$. Непрерывный ряд твердых растворов является устойчивым, точки невариантных равновесий отсутствуют.

Ключевые слова: физико-химический анализ, фазовые равновесия, фазовые диаграммы, непрерывный ряд твердых растворов

DOI: 10.31857/S0002337X24030127, **EDN:** LKDIDP

ВВЕДЕНИЕ

Расплавляемые солевые смеси на основе галогенидов щелочных металлов находят применение не только в традиционных, но и в перспективных отраслях промышленности: высокотемпературный технологический нагрев, термическая обработка и отжиг стали, а также хранение тепла на солнечных тепловых электростанциях.

Большое количество исследований в настоящее время посвящается фазовым равновесиям в различных многокомпонентных системах: солевых [1–3], металлических [4–7], оксидных [8, 9], водных [10–13] и других [14]. Тем не менее, многие системы на основе галогенидов щелочных металлов остаются недостаточно хорошо изученными. Экспериментальное исследование данных систем методом дифференциального термического анализа (ДТА) перспективно как в прикладном отношении — для поиска составов новых материалов, так и в теоретическом — для пополнения базы данных по фазовым равновесиям в многокомпонентных солевых системах. В качестве объекта исследования в данной работе был выбран стабильный тетраэдр LiF-KCl-

KBr-LiKCrO_4 пятикомпонентной взаимной системы $\text{Li}^+, \text{K}^+ \parallel \text{F}^-, \text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{CrO}_4^{2-}$.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Древо фаз пятикомпонентной взаимной системы $\text{Li}^+, \text{K}^+ \parallel \text{F}^-, \text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{CrO}_4^{2-}$ было построено в работе [15]. Оно состоит из четырех стабильных пентатопов и стабильного гексатопа, разделенных четырьмя стабильными секущими тетраэдрами. Стабильный тетраэдр $\text{LiF-KCl-KBr-LiKCrO}_4$ является одним из четырех секущих тетраэдров пятикомпонентной взаимной системы $\text{Li}^+, \text{K}^+ \parallel \text{F}^-, \text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{CrO}_4^{2-}$ и состоит из четырех индивидуальных веществ, термические и термодинамические свойства которых приведены в табл. 1 [16, 17]. Развертка граневых элементов тетраэдра приведена на рис. 1, из которого видно, что в исследуемом тетраэдре одновременно присутствуют хлорид и бромид калия, которые обладают изоморфными свойствами и после кристаллизации образуют единую твердую фазу — непрерывный ряд твердых растворов (НРТР) на основе хлорида и бромида калия $\text{KCl}_x\text{Br}_{1-x}$. Таким образом, в стабильном

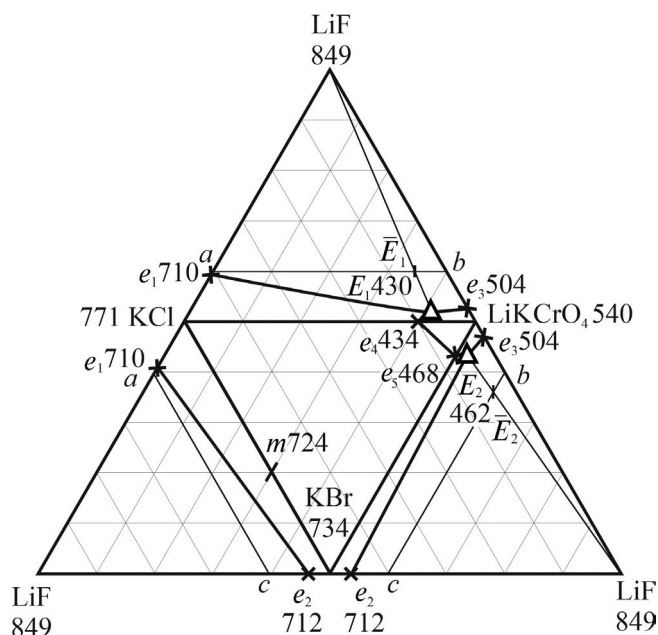


Рис.1. Развертка граневых элементов стабильного тетраэдра LiF–KCl–KBr–LiKCrO₄ пятикомпонентной взаимной системы Li⁺, K⁺||F⁻, Cl⁻, Br⁻, CrO₄²⁻.

тетраэдре можно спрогнозировать два варианта числа и состава кристаллизующихся фаз:

1) НРТР KCl_xBr_{1-x} остается устойчивым внутри тетраэдра, тогда в системе после расплавления будут кристаллизироваться 3 твердые фазы: LiF, LiKCrO₄, KCl_xBr_{1-x};

2) Если НРТР распадается, то в тетраэдре будут находиться 4 кристаллизующиеся фазы: LiF, LiKCrO₄, ограниченный ряд твердых растворов (ОРТР) на основе KCl и ОРТР на основе KBr.

Приведем имеющиеся в литературе данные по элементам ограничения стабильного тетраэдра LiF–KCl–KBr–LiKCrO₄ пятикомпонентной взаимной системы Li⁺, K⁺||F⁻, Cl⁻, Br⁻, CrO₄²⁻. Концентрации всех веществ выражены в молярных концентрациях эквивалентов.

Квазидвойные и двухкомпонентные системы. Квазидвойная система LiF–KCl – эвтектика e_1 при 710°C и составе 19% LiF + 81% KCl. Твердые фазы – LiF и KCl [18].

Квазидвойная система LiF–KBr – эвтектика e_2 при 712°C и составе 6% LiF + 94% KBr. Твердые фазы – LiF и KBr [18].

Двухкомпонентная система KCl–KBr – НРТР с минимумом m при 724°C и составе 40 % KCl + 60 % KBr. Твердая фаза – KCl_xBr_{1-x} [18].

Квазидвойная система LiF–LiKCrO₄ – эвтектика e_3 при 504°C и составе 5% LiF + 95% LiKCrO₄. Твердые фазы – LiF и LiKCrO₄ [19].

Квазидвойная система KCl–LiKCrO₄ – эвтектика e_4 при 434°C и составе 20% KCl + 80% LiKCrO₄. Твердые фазы – KCl и LiKCrO₄ [19].

Квазидвойная система KBr–LiKCrO₄ – эвтектика e_5 при 468°C и составе 14% KBr + 86% LiKCrO₄. Твердые фазы – KBr и LiKCrO₄ [20, 21].

Квазитройные системы. Квазитройная система LiF–KCl–LiKCrO₄ – эвтектика E_1 при 430°C и составе 1 % LiF + 82 % LiKCrO₄ + 17 % KCl. Твердые фазы – LiF + KCl + LiKCrO₄ [19].

Квазитройная система LiF–KBr–LiKCrO₄ – эвтектика E_2 при 462°C и составе 3% LiF + 11% KBr + 86% LiKCrO₄. Твердые фазы – LiF, KBr и LiKCrO₄ [20, 21].

Квазитройная система LiF–KCl–KBr – НРТР на основе бромида и хлорида калия. Твердые фазы – LiF и KCl_xBr_{1-x} [18].

Квазитройная система KCl–KBr–LiKCrO₄ – НРТР на основе бромида и хлорида калия. Твердые фазы – LiKCrO₄ и KCl_xBr_{1-x} [22].

Исследование фазовых равновесий в стабильном тетраэдре LiF–KCl–KBr–LiKCrO₄ проводили с помощью ДТА на установке с верхним подводом термопар [23]. Установка включает печь шахтного типа, в которую опускаются платиновые микротигли (изделия № 108–3 по ГОСТ 13498–68) с исследуемым составом и с индифферентным веществом – свежeproкаленным Al₂O₃ (“ч. д. а.”). Холодные спаи термостатировали при 0°C с помощью сосуда Дьюара с тающим льдом. Сигнал от термопар поступал на АЦП и преобразовывался в цифровой сигнал с выводом на компьютер.

Скорость нагрева (охлаждения) образцов составляла 10–15°C/мин. Точность измерения температур составляла ±2.5°C при точности взвешивания составов ±0.0001 г на аналитических весах. Масса исходных смесей составляла 0.3 г.

В работе использовали следующие реактивы: LiF – “ч. д. а.” (содержание основного вещества

Таблица 1. Термические и термодинамические свойства индивидуальных веществ

Вещество	M , г/моль	$t_{пл}$, °C	$-\Delta_f H^\circ$, кДж/ моль	$-\Delta_f G^\circ$, кДж/ моль
LiF	25.939	849	614.67	586.40
KCl	74.551	771	436.56	408.64
KBr	119.002	734	393.48	380.11
LiKCrO ₄	162.031	540	–	–

99.5 мас. %), KCl – “ч. д. а.” (содержание основного вещества 99.5 мас. %), KF – “ч. д. а.” (содержание основного вещества 99.5 мас. %), K_2CrO_4 – “ч.д.а.” (содержание основного вещества 99.9 мас. %), Li_2CrO_4 – “ч.д.а.” (содержание основного вещества 99.9 мас. %). Температуры плавления исходных солей, определенные методом ДТА (при точности измерения $\pm 2.5^\circ C$) равны: LiF – $849^\circ C$, KCl – $771^\circ C$, KBr – $734^\circ C$, Li_2CrO_4 – $485^\circ C$, K_2CrO_4 – $973^\circ C$, т.е. влияние имеющихся примесей на температуры плавления исходных солей незначительно. Соединение $LiKCrO_4$ приготовили отдельно, его температура плавления составила $540^\circ C$, что соответствует справочным данным. Таким образом, были приняты данные литературы для всех солей [16, 17]. Исходные реактивы были предварительно высушены и после охлаждения в сухом боксе помещены в бюксы, а бюксы – в эксикатор с осушителем (силикагель).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Развертка граневых элементов стабильного тетраэдра LiF–KCl–KBr– $LiKCrO_4$ представлена на рис. 1. Для его экспериментального исследования в объеме кристаллизации фторида лития было выбрано двумерное политермическое сече-

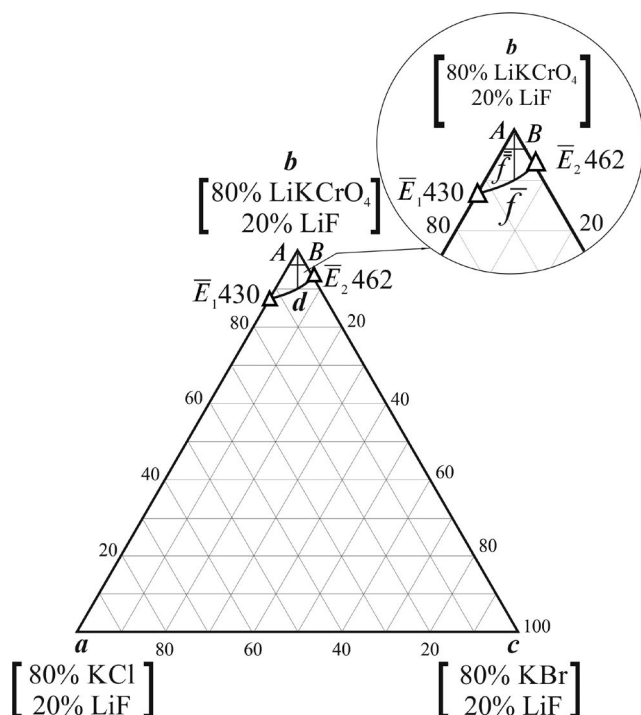


Рис. 2. Политермическое сечение abc стабильного тетраэдра LiF–KCl–KBr– $LiKCrO_4$.

ние abc (a [80% KCl + 20% LiF]; b [80% $LiKCrO_4$ + 20% LiF]; c [80% KBr + 20% LiF]). Проекция фазового комплекса политермического сечения abc на треугольник составов приведена на рис. 2. В данном сечении для дальнейшего экспериментального исследования был выбран одномерный политермический разрез AB (A [6% a + 94% b]; B [6% a + 94% c]). t – x -диаграмма выбранного разреза приведена на рис. 3. Для дальнейшего экспериментального изучения данного разреза выбран состав, соответствующий центральной точке $\bar{f}$. Из вершины b политермического сечения abc через выбранную точку f с постоянным соотношением a и c был проведен и экспериментально исследован политермический разрез bd (рис. 4). По пересечению ветвей вторичной и третичной кристаллизации были выявлены состав и температура плавления точки $\bar{f}$, которая является проекцией точки f , лежащей на моновариантной кривой E_1E_2 , на плоскость сечения abc . Исследованием политермического разреза LiFg (рис. 5), проведенного из вершины тетраэдра LiF через точку $\bar{f}$ с постоянным соотношением компонентов KCl и KBr, выявлены координаты точки f – центральной точки, лежащей на моновариантной кривой, соединяющей тройные эвтектики E_1E_2 : температура плавления – $442^\circ C$, состав – 10% LiF, 81.9% $LiKCrO_4$, 4.1% KCl, 4.1% KBr.

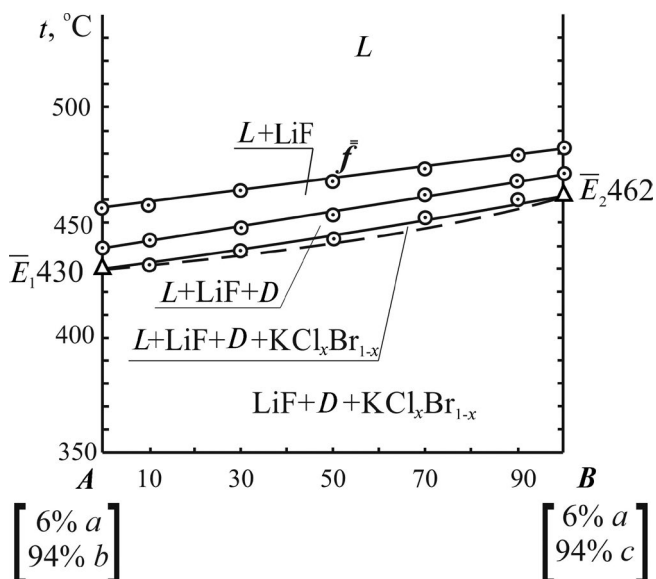


Рис. 3. t – x -диаграмма политермического разреза AB , D – соединение $LiKCrO_4$.

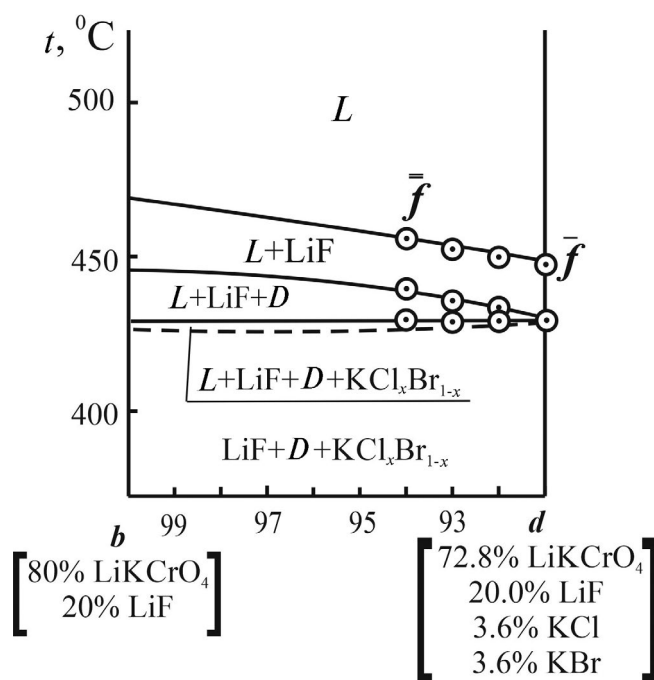


Рис. 4. t - x -диаграмма политермического разреза bd .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальное изучение стабильного тетраэдра $\text{LiF-KCl-KBr-LiKCrO}_4$ методом ДТА позволило установить, что для данного тетраэдра реализуется первый вариант прогноза кри-

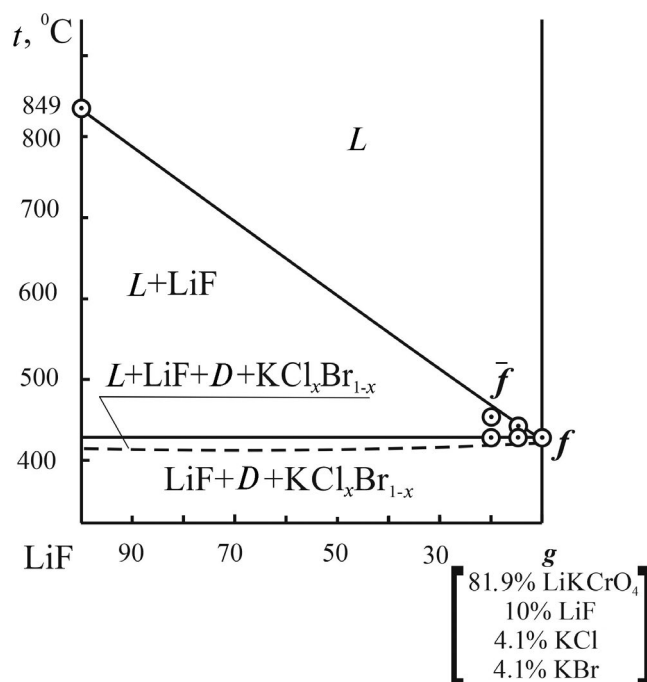


Рис. 5. t - x -диаграмма политермического разреза LiF-g .

Таблица 2. Фазовые равновесия в стабильном тетраэдре $\text{LiF-KCl-KBr-LiKCrO}_4$

Элементы диаграммы	Фазовые равновесия
Объемы:	Тривариантные:
$\text{LiF } e_3E_1e_2E_2$	$L \rightleftharpoons \text{LiF}$
$\text{LiKCrO}_4 e_3E_1E_2e_4e_5$	$L \rightleftharpoons \text{LiKCrO}_4$
$\text{KCl } e_1E_1e_4E_2e_5e_2\text{KBr}$	$L \rightleftharpoons \text{KCl}_x\text{Br}_{1-x}$
Поверхности:	Дивариантные:
$e_1E_1E_2e_2$	$L \rightleftharpoons \text{LiF} + \text{KCl}_x\text{Br}_{1-x}$
$E_1e_3E_2$	$L \rightleftharpoons \text{LiKCrO}_4 + \text{LiF}$
$E_1e_4e_5E_2$	$L \rightleftharpoons \text{KCl}_x\text{Br}_{1-x} + \text{LiKCrO}_4$
Линии:	Моновариантные:
E_1E_2	$L \rightleftharpoons \text{LiF} + \text{KCl}_x\text{Br}_{1-x} + \text{LiKCrO}_4$

сталлизирующихся фаз, то есть НРТР на основе хлорида и бромида калия является устойчивым и не распадается, в системе кристаллизуются три твердые фазы: LiF , LiKCrO_4 , $\text{KCl}_x\text{Br}_{1-x}$. Эскиз объемов кристаллизации стабильного тетраэдра $\text{LiF-KCl-KBr-LiKCrO}_4$ приведен на рис. 6.

Установлено отсутствие в системе четверных точек невариантных равновесий. На t - x -диаграмме политермического разреза AB (рис. 3)

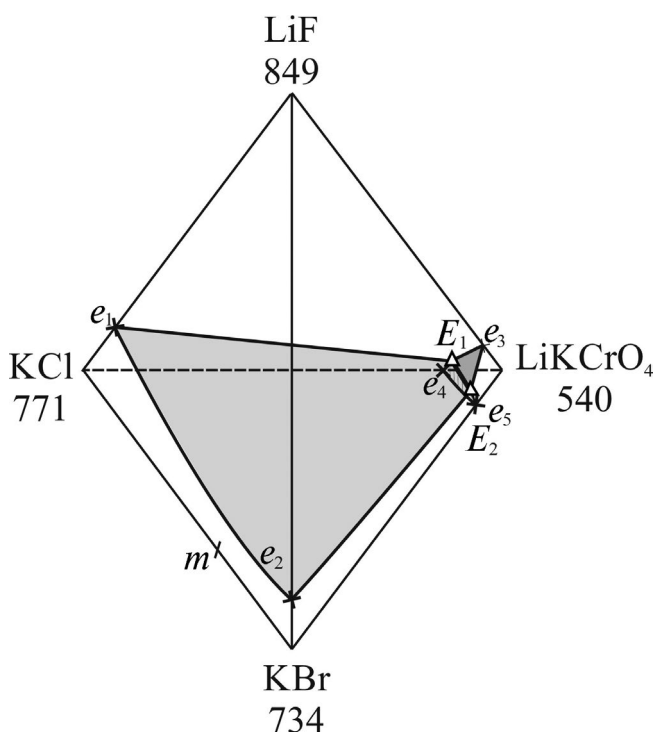


Рис. 6. Эскиз объемов кристаллизации стабильного тетраэдра $\text{LiF-KCl-KBr-LiKCrO}_4$.

линии первичной и вторичной кристаллизации представлены в виде плавных кривых, они соответствуют кристаллизации фторида лития и совместной кристаллизации фторида лития и соединения LiKCrO_4 соответственно. Линия третичной кристаллизации представлена в виде “линзы” и соответствует совместной кристаллизации фторида лития, соединения LiKCrO_4 и НРТР на основе хлорида и бромида калия. Видно, что на линии третичной кристаллизации отсутствуют экстремумы. t - x -диаграмма представлена следующими полями: выше линии ликвидуса поля жидкости между линиями первичной и вторичной кристаллизации – поле сосуществования жидкости и фторида лития, между линиями вторичной и третичной кристаллизации – поле сосуществования жидкости, фторида лития и соединения LiKCrO_4 . Поле кристаллизации внутри “линзы” соответствует сосуществованию жидкости, фторида лития, соединения LiKCrO_4 и НРТР на основе хлорида и бромида калия. Ниже линзы – поле сосуществования трех твердых фаз: фторида лития, соединения LiKCrO_4 и НРТР $\text{KCl}_x\text{Br}_{1-x}$. Любому составу, лежащему на моновариантной кривой E_1E_2 , соответствует фазовое равновесие $L \rightleftharpoons \text{LiF} + \text{LiKCrO}_4 + \text{KCl}_x\text{Br}_{1-x}$.

Исследованием политермических разрезов bd и LiFg выявили температуру плавления и состав точки f , лежащей на моновариантной кривой, соединяющей тройные эвтектики E_1E_2 . Через данную точку можно провести линию моновариантных равновесий и установить ее кривизну. Фазовые равновесия для всех объемов поверхностей и линий приведены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В стабильном тетраэдре $\text{LiF}-\text{KCl}-\text{KBr}-\text{LiKCrO}_4$ проведен прогноз числа и состава кристаллизующихся фаз. Существуют два варианта прогноза: в случае устойчивости НРТР $\text{KCl}_x\text{Br}_{1-x}$ в тетраэдре будут существовать три твердые фазы, а в случае распада – четыре.

В ходе экспериментального исследования стабильного тетраэдра методом ДТА установлено, что твердые растворы на основе хлорида и бромида калия являются устойчивыми и точки невариантных равновесий отсутствуют. В тетраэдре имеются три кристаллизующиеся фазы, одна из которых НРТР – $\text{LiF} + \text{LiKCrO}_4 + \text{KCl}_x\text{Br}_{1-x}$.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дибиров Я.А., Искендеров Э.Г., Исаков С.И. Фазовые равновесия в системе $\text{CaMoO}_4-\text{CaSO}_4-\text{CaF}_2-\text{CaCl}_2$ // Неорган. материалы. 2023. Т. 59. № 5. С. 515–520.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X23050020>
2. 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 $\text{Li}_3\text{Ba}_2\text{Gd}_3(\text{MoO}_4)_8:\text{Er}^{3+}$ // Неорган. материалы. 2023. Т. 59. № 1. С. 100–106.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X23010128>
3. Машадиева Л.Ф., Алиева З.М., Мирзоева Р.Дж., Юсубов Ю.А., Шевельков А.В., Бабанлы М.Б. Фазовые равновесия в системе $\text{Cu}_2\text{Se}-\text{GeSe}_2-\text{SnSe}_2$ // Журн. неорган. химии. 2022. Т. 67. № 5. С. 606–619.
<https://doi.org/10.31857/S0044457X22050129>
4. Хвостиков В.П., Хвостикова О.А., Потапович Н.С., Власов А.С. Исследование фазовых равновесий в системе $\text{Al}-\text{Ga}-\text{As}-\text{Bi}$ при 900°C // Неорган. материалы. 2023. Т. 59. № 7. С. 721–725.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X23070084>
5. Восков А.Л., Ковалев И.А., Кочанов Г.П., Шкодько А.В., Огарков А.И., Стрельникова С.С., Чернявский А.С., Солнцев К.А. Термодинамическое моделирование фазовых равновесий в системе $\text{Nb}-\text{Zr}-\text{N}$ // Неорган. материалы. 2022. Т. 58. № 5. С. 530–537.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X22050116>
6. Федоров П.П., Попов А.А., Шубин Ю.В., Чернова Е.В. Фазовая диаграмма системы никель–платина // Журн. неорган. химии. 2022. Т. 67. № 12. С. 1805–1809.
<https://doi.org/10.31857/S0044457X22600748>
7. Баженова И.А., Шакирова Ю.Д., Хван А.В., Чеве-рикин В.В. Экспериментальное исследование фазовых равновесий в системе железо–гольмий // Журн. физ. химии. 2022. Т. 67. № 12. С. 1717–1723.
<https://doi.org/10.31857/S0044457X22120056>
8. Смирнова М.Н., Копьева М.А., Нипан Г.Д., Никифорова Г.Е. Фазообразование в системе $\text{MgO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$ // Журн. неорган. химии. 2022. Т. 67. № 11. С. 1638–1645.
<https://doi.org/10.31857/S0044457X22600591>

9. Зайцева Н.А., Самигулина Р.Ф., Иванова И.В., Красенко Т.И. Фазовые равновесия и химические взаимодействия в системах $Mn_2O_3-ZnO-SiO_2$, $Mn_3O_4-ZnO-SiO_2$ и $MnO-ZnO-SiO_2$ // Журн. неорган. химии. 2023. Т. 68. № 12. С. 1779–1785. <https://doi.org/10.31857/S0044457X23601347>
10. Фролова Е.А., Кондаков Д.Ф., Кириленко И.А., Балакаева И.В., Данилов В.П. 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>
11. 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>
12. Елохов А.М., Кудряшова О.С., Лукманова Л.М., Овсянникова А.А. 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>
13. 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>
14. Солонина И.А., Макаев С.В., Родникова М.Н., Киселев М.Р., Хорошилов А.В. Низкотемпературные фазовые равновесия в системе этиленгликоль–ацетон // Журн. физ. химии. 2023. Т. 97. № 2. С. 210–215. <https://doi.org/10.31857/S0044453723020267>
15. Егорова А.С., Сухаренко М.А., Кондратюк И.М., Гаркушин И.К. Дерево фаз пятикомпонентной взаимной системы $Li^+, K^+||F^-, Cl^-, Br^-, CrO_4^{2-}$ и исследование стабильного тетраэдра $LiF-Li_2CrO_4-KCl-KBr$ // Неорган. материалы. 2023. Т. 59. № 8. С. 904–910. <https://doi.org/10.31857/S0002337X23080043>
16. Термические константы веществ. Вып.Х. Ч.1. Таблица принятых значений: Li, Na /Под ред. В.П. Глушко. М., 1981. 297 с.
17. Термические константы веществ. Вып.Х. Ч.1. Таблица принятых значений: K, Rb, Cs, Fr /Под ред. В.П. Глушко. М., 1981. 439 с.
18. Чугунова М.В., Гаркушин И.К., Егорцев Г.Е. Разбиение четырехкомпонентной взаимной системы $Li, K||F, Cl, Br$ на симплексы и изучение взаимодействия компонентов стабильного треугольника $LiF-KCl-KBr$ // Журн. неорган. химии. 2011. Т. 56. № 4. С. 678–683.
19. Демина М.А., Егорова Е.М., Гаркушин И.К., Игнатьева Е.О. Фазовые равновесия в стабильном тетраэдре $LiF-LiCl-Li_2CrO_4-KCl$ четырехкомпонентной взаимной системы $Li, K||F, Cl, CrO_4$ // Журн. неорган. химии. 2022. Т. 67. № 10. С. 1446–1452. <https://doi.org/10.31857/S0044457X22100154>
20. Демина М.А., Гаркушин И.К., Ненашева А.В., Чудова А.А. Фазовые равновесия в стабильном тетраэдре $LiF-LiBr-Li_2CrO_4-KBr$ четырехкомпонентной взаимной системы $Li, K||F, Br, CrO_4$ // Журн. неорган. химии. 2016. Т. 61. № 5. С. 670–676. <https://doi.org/10.7868/S0044457X16050056>
21. Демина М.А., Ненашева А.В., Чудова А.А., Гаркушин И.К. Фазовые равновесия в стабильном тетраэдре $LiF-KF-KBr-K_2CrO_4$ четырехкомпонентной взаимной системы $Li, K||F, Br, CrO_4$ // Журн. неорган. химии. 2016. Т. 61. № 7. С. 927–930. <https://doi.org/10.7868/S0044457X16070035>
22. Воронина Е.Ю., Демина М.А. Экспериментальное исследование секущих элементов $KCl-KBr-LiKCrO_4$ и $KCl-KBr-Li_2CrO_4$ четырехкомпонентной взаимной системы $Li, K||Cl, Br, CrO_4$ // Бутлеровские сообщения. 2015. Т. 42. № 6. С. 81–85.
23. Мощенский Ю.В. Дифференциальный сканирующий колориметр ДСК–500 // Приборы и техника эксперимента. 2003. № 6. С. 143–144.