

УДК: 544.1, 544.015.3, 544.018.4

3D-МОДЕЛЬ СТАБИЛЬНОГО ТРЕУГОЛЬНИКА LiF–NaBr–KBr ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ВЗАИМНОЙ СИСТЕМЫ Li^+ , Na^+ , $\text{K}^+ \parallel \text{F}^-$, Br^-

© 2024 г. А. В. Бурчаков¹, И. К. Гаркушин¹, Е. М. Дворянова^{1,*},
У. А. Емельянова¹, А. А. Финогенов¹

¹Самарский государственный технический университет, Россия

*e-mail: dvoryanova_kat@mail.ru

Поступила в редакцию 01.12.2023

После доработки 08.04.2024

Принята к публикации 12.05.2024

Построена 3D-модель фазовых равновесных состояний квазитрехкомпонентной системы LiF–NaBr–KBr, являющейся стабильным треугольником четырехкомпонентной взаимной системы Li^+ , Na^+ , $\text{K}^+ \parallel \text{F}^-$, Br^- . На основе 3D-модели построены впервые политермические, изотермические разрезы и политерма кристаллизации фаз. На двух политермических разрезах присутствуют широкие области граничных твердых растворов на основе бромидов натрия и калия. На изотермическом разрезе при 650 °C разграничены поля жидкой фазы и сосуществующих двух и трех фаз. Политерма кристаллизации представлена тремя полями. В поле кристаллизации фторида лития ограничена область расслоения двух жидкостей. Направление протекания реакции ионного обмена $2\text{LiBr} + \text{NaF} + \text{KF} = 2\text{LiF} + \text{NaBr} + \text{KBr}$ подтверждено термодинамическими расчетами при температурах 400, 600, 800, 1000 К. Экзотермический характер реакции обмена подтвержден снятием кривой ДТА нагрева смеси порошков из 50% LiBr + 25% NaF + 25% KF, а фазовый состав продуктов реакции LiF + NaBr(ОТР) + KBr(ОТР) подтвержден данными рентгенофазового анализа, где ОТР – ограниченный твердый раствор.

Ключевые слова: Т-х-диаграмма, 3D-модель фазового комплекса, поля кристаллизации, ликвидус, дифференциальный термический анализ, рентгенофазовый анализ.

DOI: 10.31857/S0235010624040046

ВВЕДЕНИЕ

Применение расплавов из солей лития, натрия и калия в современных науке, технике и технологии связано с теплоаккумулирующими материалами [1, 2, 3], электролитами для химических источников тока [4–6], для жидкосольевых ядерных реакторов [7]. Применение расплавов в различных областях промышленности и научных исследованиях основано на изучении свойств расплавов и химических процессов, протекающих в них [8]. Расплавленные

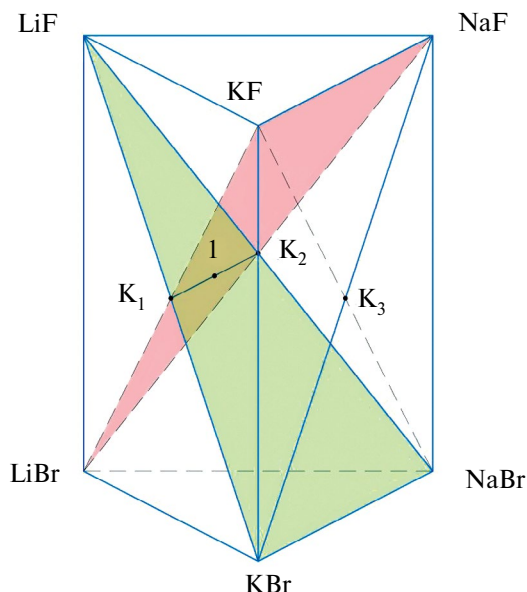


Рис. 2. Призма составов системы Li^+ , Na^+ , $\text{K}^+ \parallel \text{F}^-$, Br^- [19].

К-09-000285. Методика моделирования фазового комплекса трехкомпонентной системы основывается на построении в виртуальном 3D-пространстве программы-редактора векторной графики (например, программы КОМПАС 3D) совокупности точек по координатам состава и температуры невариантного равновесия, соединения этих точек линиями моновариантного равновесия на основе структурного анализа фазовой диаграммы и получения поверхностей дивариантного равновесия [20].

Определение направления протекания реакции ионного обмена $2\text{LiBr} + \text{NaF} + \text{KF} = 2\text{LiF} + \text{NaBr} + \text{KBr}$ проведено термодинамическим методом по данным энтальпий и энергий Гиббса индивидуальных веществ для стандартной и более высоких температур [22–24].

Экспериментальное исследование химического взаимодействия по методике, предложенной в [25], исследовано с использованием дифференциального термического анализа и термогравиметрии на дериватографе MOM Q-1500D в режиме контролируемой скорости нагрева $20^\circ/\text{мин}$ от 25 до 850°C в платиновых тиглях для дериватографа с нижним подводом термопар [26–29]. Масса навесок составляла 1 г. Все составы – эквивалентные доли, выраженные в процентах. Квалификация исходных реактивов: LiBr, NaF, KF – «х.ч.», индифферентное вещество – свежепрокаленный оксид алюминия «ч.д.а.» Температуры плавления веществ соответствовали справочным данным [22, 23]. Рентгенофазовый анализ (РФА) составов проводили на дифрактометре ARL X'TRA. Съемку дифрактограммы осуществляли в CuK_α -излучении с никелевым β -фильтром.

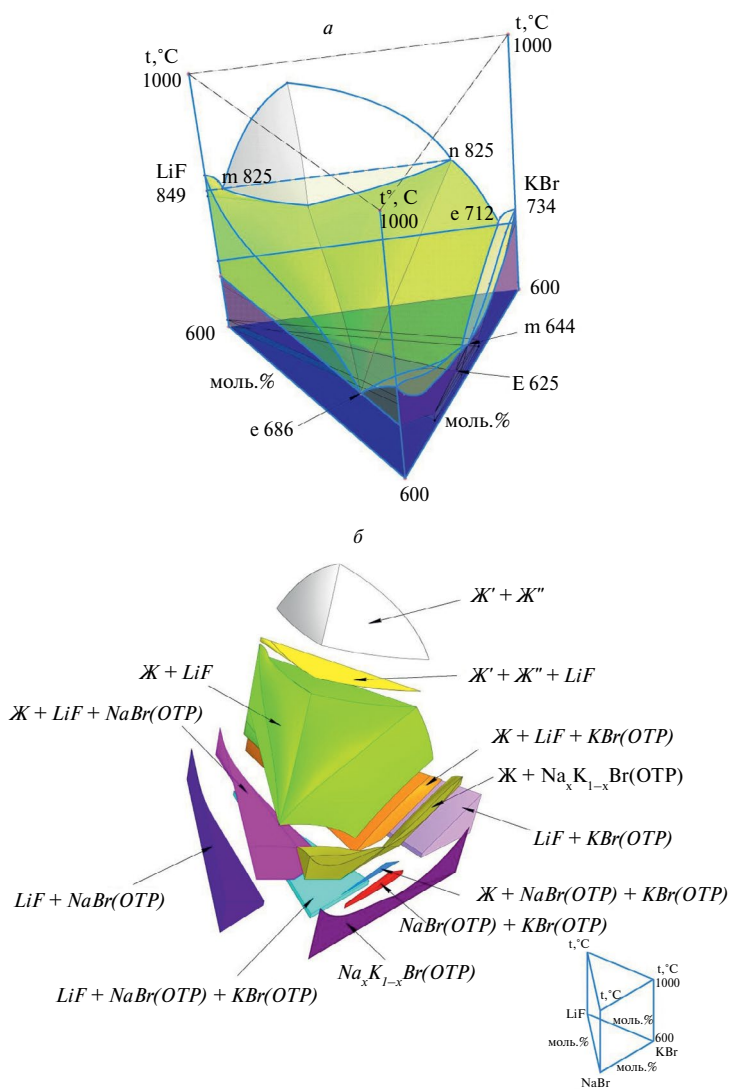


Рис. 3. 3D-модель квазитройной системы LiF–NaBr–KBr: а) фазовый комплекс системы; б) разъемная модель фазового комплекса.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3D – моделирование фазового комплекса квазитройной системы

LiF–NaBr–KBr

Квазитройная система LiF–NaBr–KBr является стабильным треугольником четырехкомпонентной взаимной системы Li^+ , Na^+ , $\text{K}^+ \parallel \text{F}^-$, Br^- (рис. 1). Используя данные по двойной (NaBr–KBr) и квазидвойным (LiF–KBr, LiF–NaBr) системам, изученным в [19], построена 3D-модель квазитройной системы (рис. 3).

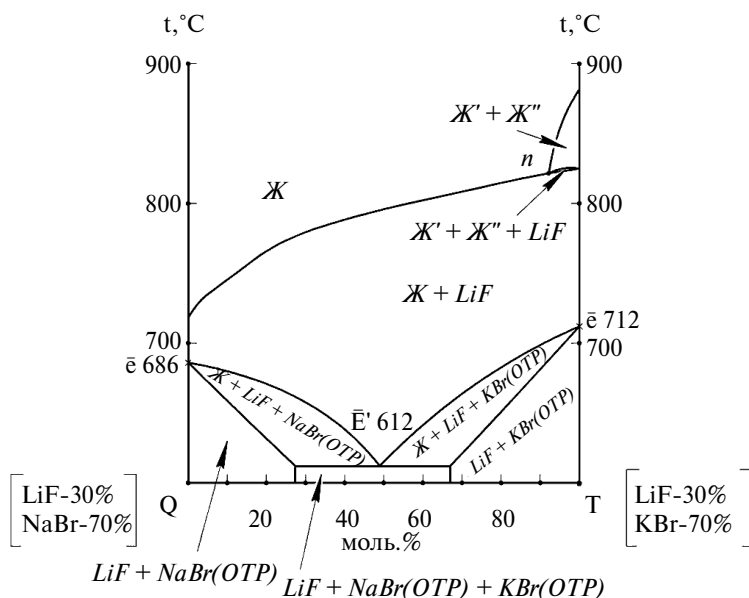


Рис. 4. Т-х-диаграмма разреза QT квазитройной системы LiF–NaBr–KBr, построенная из 3D-модели.

В стабильном треугольнике LiF–NaBr–KBr присутствуют три поверхности кристаллизации LiF, NaBr и KBr, которые пересекаются по трем моновариантным кривым, сходящимся в тройной эвтектике E612, а также область расслаивания жидких фаз [19].

Полученная 3D модель позволяет построить политермические и изотермические разрезы. На рис. 4 приведена Т-х-диаграмма разреза QT (Q — 30 мол. % LiF + 70 мол. % NaBr; T — 30 мол. % LiF + 70 мол. % KBr), параллельного стороне NaBr–KBr треугольника составов. На рис. 5 приведена Т-х-диаграмма разреза K_1K_2 (K_1 —50 мол. % LiF + 50 мол. % NaBr; K_2 —50 мол. % LiF + 50 мол. % KBr), также параллельного стороне NaBr–KBr треугольника составов.

На рис. 6 изображен изотермический разрез при температуре 650 °С, построенный из 3D модели квазитройной системы LiF–NaBr–KBr.

На рис. 7 изображена политерма кристаллизации, построенная из 3D-модели квазитройной системы LiF–NaBr–KBr.

Дифференциальный термический анализ и термогравиметрия реакционной смеси $2\text{LiBr} + \text{NaF} + \text{KF}$

Для подтверждения стабильности треугольника LiF–NaBr–KBr исследовано взаимодействие порошкообразной гомогенизированной смеси 50% LiBr + 25% NaF + 25% KF (т. 1, линия конверсии K_1 – K_2 ; рис. 8).

При нагревании смеси 50% LiBr + 25% NaF + 25% KF (рис. 9) фиксируется на ДТА несколько размытый экзоэффект при 320 °С, эндоэффект при 603, 623 и

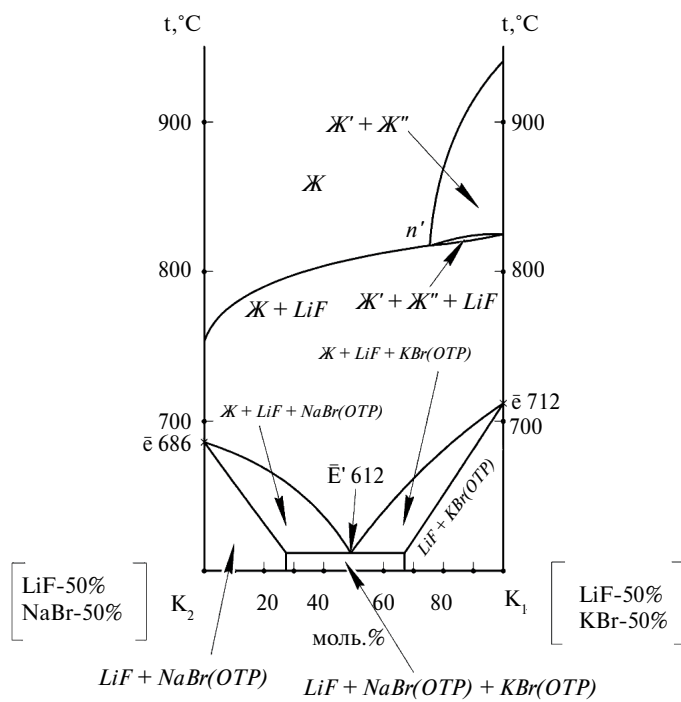


Рис. 5. Т-х-диаграмма разреза K_1K_2 квазитройной системы LiF-NaBr-KBr , построенная из 3D-модели.

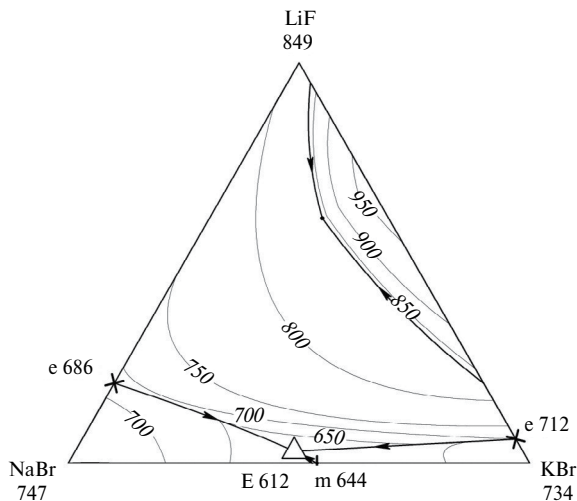


Рис. 6. Изотермический разрез при температуре 650°C квазитройной системы LiF-NaBr-KBr , построенный из 3D-модели.

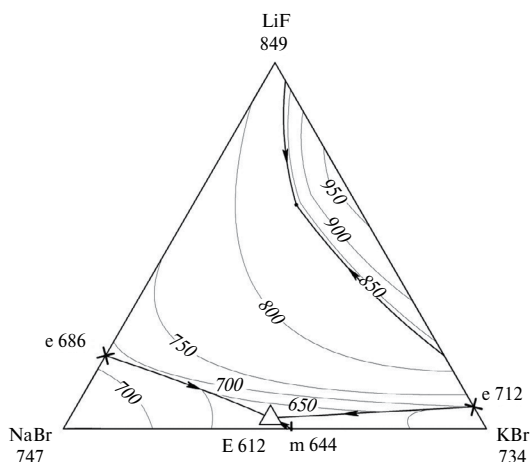


Рис. 7. Политерма кристаллизации квазитройной системы LiF–NaBr–KBr, построенная из 3D-модели.

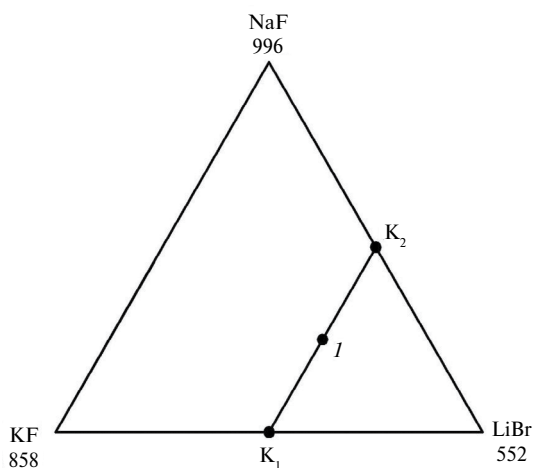


Рис. 8. Расположение смеси 1 на линии конверсии K_1 – K_2 в нестабильном треугольнике NaF–KF–LiBr.

759 °C. На кривой ΔT охлаждения расплава (рис. 10) фиксируется три экзоэффекта при 764, 623 и 605 °C. Рентгенограмма смеси после реакции содержит фазы LiF + NaBr(ОТР) + KBr(ОТР) (рис. 11). Под ОТР понимается ограниченный твердый раствор на основе бромида натрия и ограниченный твердый раствор на основе бромида калия. Рефлексы на дифрактограмме отвечают фазам фторида лития, бромида натрия и бромида калия. Для бромидов натрия и калия рефлексы наблюдаются с небольшим смещением, поскольку в трехкомпонентной эвтектике кристаллизуются не чистые компоненты NaBr + KBr, а фазы с внедрением одного бромида в кристаллическую решетку другого.

Таблица 1. Энтальпии и энергии Гиббса реакции при различных температурах

Центральная точка линии конверсии	Реакция	Температура, К	Энтальпия реакции, $-\Delta_r H$, кДж	Энергия Гиббса, $-\Delta_r G$, Дж
т. 1 ($K_1 - K_2$)	$2\text{LiBr} + \text{NaF} + \text{KF} = 2\text{LiF} + \text{NaBr} + \text{KBr}$	400	143.669	138.473
		600	144.242	135.753
		800	145.628	132.755
		1000	182.52	121.721

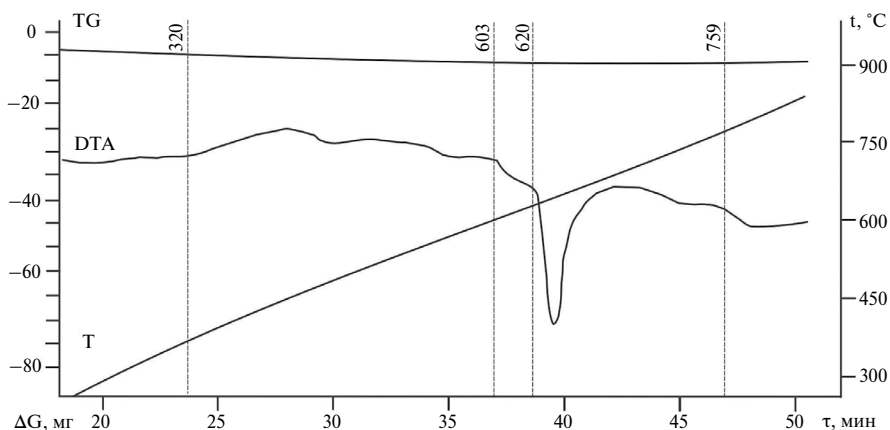
ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ химического взаимодействия в трех- и четырехкомпонентных взаимных системах

Расчет энтальпий и энергий Гиббса реакции обмена в смесях, отвечающих точкам конверсии тройных взаимных систем для температуры 298К, а также для смеси, отвечающей центральной точке линии конверсии K_1-K_2 , показал незначительные абсолютные и относительные отклонения в определении направления реакций обмена при температурах 400, 600, 800 К (табл. 1). Только для $T = 1000\text{К}$ имеются отклонения ~ до 20% по сравнению со стандартными энтальпиями и энергиями Гиббса реакций обмена.

Анализ результатов твердофазного взаимодействия в смесях и кристаллизующихся фаз в стабильных треугольниках

Рассмотрим анализ кривых нагревания и охлаждения смеси 1 (рис. 9, 10), отвечающих центральной точке линии конверсии K_1-K_2 (рис. 2, 8). Экзоэффект на

**Рис. 9.** Дериватограмма нагревания смеси порошков 50% LiBr + 25% NaF + 25% KF.

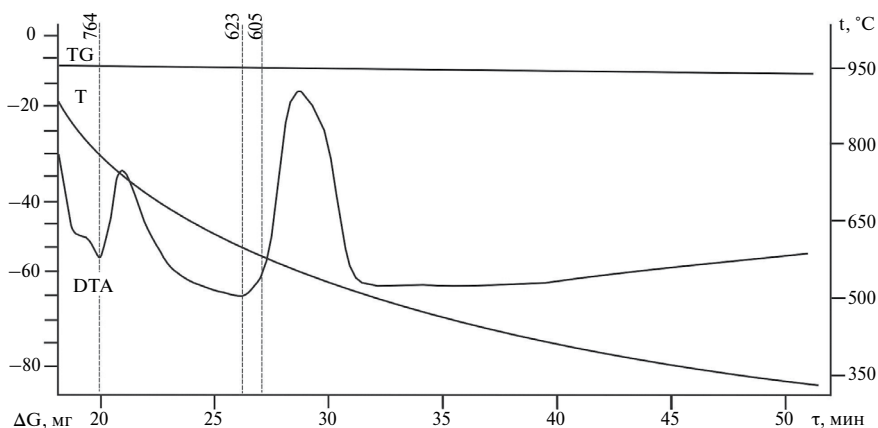


Рис. 10. Дериватограмма охлаждения расплава смеси порошков 50% LiBr + 25% NaF + 25% KF.

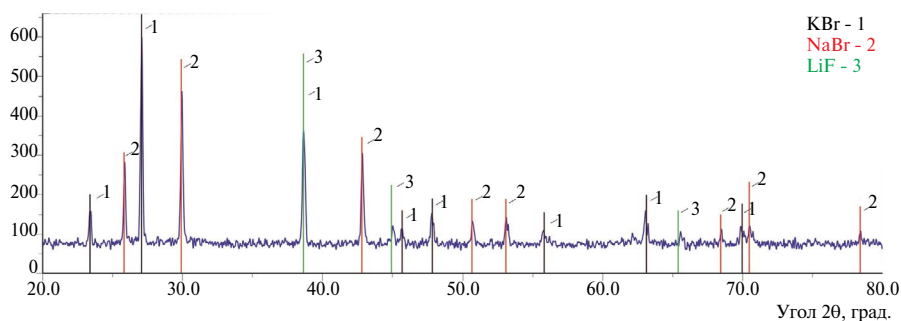


Рис. 11. Рентгенограмма образца состава 50% LiBr + 25% NaF + 25% KF (KBr PDF 01-072-1541; NaBr PDF 01-078-0761; LiF PDF 01-071-3743).

кривой нагревания смеси 1 (рис. 9) соответствует практически температуре плавления четверной эвтектики в тетраэдре LiF–LiBr–NaBr–KBr системы Li^+ , Na^+ , $\text{K}^+ \parallel \text{F}^-$, Br^- . Второй, третий и четвертый термоэффекты отвечают температурам плавления квазитройной эвтектики в стабильном треугольнике LiF–NaBr–KBr, вторичной кристаллизации и температуре ликвидуса [23].

На кривой охлаждения первый экзоэффект при 644 °C отвечает ликвидусу в т. 1, как видно из схемы кристаллизации, приведенной на рис. 12, т.е. кристаллизации LiF, второй 623 °C и третий 603 °C экзоэффекты отвечают кристаллизации LiF + KBr(ОТР) и LiF + KBr(ОТР) + NaBr(ОТР) (рис. 10, 12). Фазы стабильного треугольника подтверждены данными РФА (рис. 11, 12) смеси 1 (линия K_1 – K_2). Максимальное поле кристаллизации в стабильном треугольнике принадлежит фториду лития, в котором выделена область расслаивания двух жидких фаз $J' + J''$.

Данные разрезов позволили установить последовательность кристаллизующихся фаз и соотношение фаз при 650 °С.

2. Построена политерма кристаллизации стабильного треугольника LiF–NaBr–KBr. На основании политермы можно выбрать составы для практического использования в качестве электролитов среднетемпературных химических источников тока, теплоносителей и растворителей неорганических веществ.

3. Рассчитаны энтальпии и энергии Гиббса реакций для смесей в точках полной конверсии тройных взаимных систем и для смеси 25% мол. NaF + 25% мол. KF + 50% мол. LiBr четырехкомпонентной взаимной системы Li^+ , Na^+ , K^+ , F^- , Br^- . Показано, что необратимый характер взаимодействия сохраняется для стандартной и температур 400, 600, 800 и 1000 °С.

4. Необратимость реакции обмена $2\text{LiBr} + \text{NaF} + \text{KF} = 2\text{LiF} + \text{NaBr} + \text{KBr}$ подтверждена исследованием исходной порошкообразной гомогенизированной смеси методом термогравиметрии, на кривой ΔT нагревания которой отмечено наличие экзoeffекта при 353 °С, а также наличием фаз LiF, NaBr(ОТР), KBr(ОТР), подтвержденных методом РФА после кристаллизации из расплава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ma L., Zhang C., Wu Yu. at al. // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2012. **235**. 111485. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111485>
2. Caraballo A., Galán-Casado S., Caballero Á. at al. // *Energies*. 2021. **14**. I. 4. <https://doi.org/10.3390/en14041197>
3. Bauer T., Odenthal Ch., Bonk A. // *Chemie Ingenieur Technic*. 2021. **93**. I. 4. P. 534–546. <https://doi.org/10.1002/cite.202000137>
4. Masset P., Guidotti R.A. // *Journal of Power Sources*. 2007. **164**. P. 397–414. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.10.080>
5. Khokhlov V.A. // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2010. № 2. P. 96–104. <https://doi.org/10.1134/S0036029510020047>
6. Химические источники тока: Справочник / Под ред. Н.В. Коровина, А.М. Скундина. М.: Издательство МЭИ. 2003.
7. Roper R., Harkema M., Sabharwall P. at al. // *Annals of Nuclear Energy*. 2022. **69**. 108924. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108924>
8. Роженцев Д.А., Ткачев Д.А. // *Расплавы*. 2023. № 6. С. 570–576. <https://doi.org/10.31857/S0235010623060063>
9. Khokhlov V.A., Ignatiev V.V., Afonichkin V. Evaluating physical properties of molten salt reactor fluoride mixtures // *J. of Fluorine Chemistry*. 2009. **130**. № 1. P. 30 – 37.
10. Новоселова А.В., Смоленский В.В., Бове А.Л. // *Расплавы*. 2023. № 5. С. 443–453. <https://doi.org/10.31857/S0235010623040047>
11. Гаркушин И.К., Кондратюк И.М., Дворянова Е.М. и др. Анализ, прогнозирование и экспериментальное исследование рядов систем из галогенидов щелочных и щелочноземельных элементов. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2007.
12. Peng Q., Ding J., Wei X. at al. // *Applied Energy*. 2010. **87**. I. № 9. P. 2812–2817. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.022>
13. Serp J., Allibert M., Beneš O. at al. // *Progress in Nuclear Energy*. 2014. **77**. P. 308–319. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.02.014>
14. Диаграммы плавкости солевых систем. Ч. I. Двойные системы с общим анионом / Под ред. В.И. Посыпайко, Е.А. Алексеевой. М.: Металлургия. 1977.

15. Диаграммы плавкости солевых систем. Ч. II. Двойные системы с общим анионом / Под ред. В.И. Посыпайко, Е.А. Алексеевой. М.: Металлургия. 1977.
16. Диаграммы плавкости солевых систем. Ч. III. Двойные системы с общим катионом / Под ред. В.И. Посыпайко, Е.А. Алексеевой. М.: Металлургия. 1979.
17. Диаграммы плавкости солевых систем. Тройные взаимные системы / Под ред. В.И. Посыпайко, Е.А. Алексеевой. М.: Химия. 1977.
18. Диаграммы плавкости солевых систем. Многокомпонентные системы / Под ред. В.И. Посыпайко, Е.А. Алексеевой М.: Химия. 1977.
19. Егорцев Г.Е., Гаркушин И.К., Истомова М.А. Фазовые равновесия и химическое взаимодействие в системах с участием фторидов и бромидов щелочных металлов. Екатеринбург: УрО РАН, 2008.
20. Бурчаков А.В., Гаркушин И.К., Милов С.Н. / Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2018. **18**. № 4. С. 370
<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2018-18-4-370-377>
21. Kang J. 3D Stereo spatial phase diagram for typical complex ternary system // J. Kang. Material Sci & Eng. 2019. **3**. I. № 1. P. 38–40.
22. Термические константы веществ: Справочник. / Под ред. В.П. Глушко. М.: ВНИИ-ТИ, 1981. X. № 1.
23. Термические константы веществ: Справочник. / Под ред. В.П. Глушко. М.: ВНИИ-ТИ, 1981. X. № 2.
24. Barin I. Thermochemical data of pure substances. VCH Verlagsgesellschaft mbH. Weinheim, 1995.
25. Гаркушин И.К., Истомова М.А., Гаркушин А.И. и др. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2020. **63**. № 4. С. 55–62.
<https://doi.org/10.6060/ivkkt.20206304.6159>.
26. Егунов В.П. Введение в термический анализ. Самара, 1996.
27. Wagner M. Thermal Analysis in Practice: Fundamental Aspects. Hanser Publications. 2018. P. 158.
28. Мошенский Ю.В. // Приборы и техника эксперимента. М.: РАН. 2003. **46**. № 6. С. 143.
29. Федотов С.В., Мошенский Ю.В. Интерфейсное программное обеспечение DSCTool. Самара: Самар. гос. техн. ун-т. 2004.

3D MODEL OF A STABLE TRIANGLE LiF–NaBr–KBr FOUR-COMPONENT RECIPROCAL SYSTEM Li^+ , Na^+ , K^+ || F^- , Br^-

A. V. Burchakov¹, I. K. Garkushin¹, E. M. Dvoryanova^{1, *}, U. A. Emelyanova¹,
A. A. Finogenov¹

¹ Samara State Technical University, Russia

*e-mail: dvoryanova_kat@mail.ru

A 3D model of the phase equilibrium states of the quasi-three-component system LiF–NaBr–KBr, which is a stable triangle of the four-component reciprocal system Li^+ , Na^+ , K^+ || F^- , Br^- , has been constructed. Based on the 3D-model, polythermal, isothermal sections and the polytherm of phase crystallization were constructed for the first time. Two polythermal sections contain wide areas of boundary solid solutions based on sodium and potassium bromide. In an isothermal section at 650 °C, the fields of the liquid phase and the coexisting two and three phases are delimited.

The crystallization polytherm is represented by three fields. In the crystallization field of lithium fluoride, the area of separation of two liquids is limited. The direction of the ion exchange reaction $2\text{LiBr} + \text{NaF} + \text{KF} = 2\text{LiF} + \text{NaBr} + \text{KBr}$ was confirmed by thermodynamic calculations at temperatures of 400, 600, 800, 1000K. The exothermic nature of the exchange reaction is confirmed by taking a DTA heating curve for a mixture of powders from 50% LiBr + 25% NaF + 25% KF, and the phase composition of the reaction products LiF + NaBr(OTR) + KBr(OTR) is confirmed by X-ray phase analysis data, where OTR is limited solid solution.

Key words: T-x-diagram, 3D model of a phase complex, crystallization fields, liquidus, differential thermal analysis, X-ray phase analysis.

REFERENCES

1. Ma L., Zhang C., Wu Yu. at al. // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2012. **235**. 111485. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111485>
2. Caraballo A., Galán-Casado S., Caballero Á. at al. // Energies. 2021. **14**. I. 4. <https://doi.org/10.3390/en14041197>
3. Bauer T., Odenthal Ch., Bonk A. // Chemie Ingenieur Technik. 2021. **93**. I. 4. P. 534–546. <https://doi.org/10.1002/cite.202000137>
4. Masset P., Guidotti R.A. // Journal of Power Sources. 2007. **164**. P. 397–414. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.10.080>
5. Khokhlov V.A. // Russian Metallurgy (Metally). 2010. № 2. P. 96–104. <https://doi.org/10.1134/S0036029510020047>
6. Khimicheskiye istochniki toka: Spravochnik [Chemical current sources: Directory] / Ed. N.V. Korovina, A.M. Skundina. M.: Izdatel'stvo MEI. 2003. [In Russian].
7. Roper R., Harkema M., Sabharwall P. at al. // Annals of Nuclear Energy. 2022. **69**. 108924. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108924>
8. Rozhentsev D.A., Tkachev D.A. // Rasplavy. 2023. № 6. P. 570–576. [In Russian]. <https://doi.org/10.31857/S0235010623060063>
9. Khokhlov V.A., Ignatiev V.V., Afonichkin V. Evaluating physical properties of molten salt reactor fluoride mixtures // J. of Fluorine Chemistry. 2009. **130**. № 1. P. 30–37.
10. Novoselova A.V., Smolenskiy V.V., Bove A.L. // Rasplavy. 2023. № 5. P. 443–453. [In Russian]. <https://doi.org/10.31857/S0235010623040047>
11. Garkushin I.K., Kondratyuk I.M., Dvoryanova Ye.M. Analiz, prognozirovaniye i eksperimental'noye issledovaniye ryadov sistem iz galogenidov shchelochnykh i shchelochnozemel'nykh elementov [Analysis, prediction and experimental study of a series of systems of halides of alkali and alkaline earth elements]. Samara: Samar. gos. tekhn. un-t, 2007. [In Russian].
12. Peng Q., Ding J., Wei X. at al. // Applied Energy. 2010. **87**. I. № 9. P. 2812–2817. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.022>
13. Serp J., Allibert M., Beneš O. at al. // Progress in Nuclear Energy. 2014. **77**. P. 308–319. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.02.014>
14. Diagrammy plavkosti solevykh sistem. Ch. I. Dvoynnye sistemy s obshchim anionom [Fusibility diagrams of salt systems. Part I. Binary systems with a common anion] / Edited by V.I. Posypaiko, E.A. Alekseeva. M.: Metallurgiya. 1977. [In Russian].
15. Diagrammy plavkosti solevykh sistem. Ch. II. Dvoynnye sistemy s obshchim anionom [Fusibility diagrams of salt systems. Part II. Binary systems with a common anion] / Edited by V.I. Posypaiko, E.A. Alekseeva. M.: Metallurgiya. 1977. [In Russian].

16. Diagrammy plavkosti solevykh sistem. Ch. III. Dvoynnye sistemy s obshchim kationom [Fusibility diagrams of salt systems. Part III. Binary systems with a common cation] / Edited by V.I. Posypaiko, E.A. Alekseeva. M.: Metallurgiya. 1979. [In Russian].
17. Diagrammy plavkosti solevykh sistem. Troynnye vzaimnyye sistemy [Fusibility diagrams of salt systems. Triple reciprocal systems] / Edited by V.I. Posypayko, Ye.A. Alekseyevoy. M.: Khimiya. 1977. [In Russian].
18. Diagrammy plavkosti solevykh sistem. Mnogokomponentnyye sistemy [Fusibility diagrams of salt systems. Multicomponent systems] / Edited by V.I. Posypayko, Ye.A. Alekseyevoy. M.: Khimiya. 1977. [In Russian].
19. Yegortsev G.Ye., Garkushin I.K., Istomova M.A. Fazovyye ravnovesiya i khimicheskoye vzaimodeystviye v sistemakh s uchastiyem fluoridov i bromidov shchelochnykh metallov [Phase equilibria and chemical interaction in systems involving fluorides and bromides of alkali metals]. Yekaterinburg: UrO RAN, 2008. [In Russian].
20. Burchakov A.V., Garkushin I.K., Milov S.N. // Izv. Sarat. un-ta. Nov. ser. Ser. Khimiya. Biologiya. Ekologiya. 2018. **18**. № 4. P. 370. [In Russian]. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2018-18-4-370-377>
21. Kang J. 3D Stereo spatial phase diagram for typical complex ternary system // J. Kang. – Material Sci & Eng. 2019. **3**. I. № 1. P. 38–40.
22. Termicheskiye konstanty veshchestv. Spravochnik [Thermal constants of substances. Directory] / Edited by V.P. Glushko. M.: VINITI, 1981. **X**. № 1. [In Russian].
23. Termicheskiye konstanty veshchestv. Spravochnik [Thermal constants of substances. Directory] / Edited by V.P. Glushko. M.: VINITI, 1981. **X**. № 2. [In Russian].
24. Barin I. Thermochemical data of pure substances. VCH Verlagsgesellschaft mbH. Weinheim, 1995.
25. Garkushin I.K., Istomova M.A., Garkushin A.I. i dr. // Izv. vuzov. Khimiya i khim. tekhnologiya. 2020. **63**. № 4. C. 55–62. [In Russian]. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20206304.6159>
26. Yegunov V.P. Vvedeniye v termicheskiy analiz [Introduction to Thermal Analysis]. Samara, 1996. [In Russian].
27. Wagner M. Thermal Analysis in Practice: Fundamental Aspects. Hanser Publications. 2018. P. 158.
28. Moshchenskiy Yu.V. // Pribory i tekhnika eksperimenta. M.: RAN. 2003. **46**. № 6. C. 143. [In Russian].
29. Fedotov S.V., Moshchenskiy Yu.V. Interfeysnoye programmnoye obespecheniye DSCTool [Interface software DSCTool]. Samara: Samar. gos. tekhn. un-t. 2004. [In Russian].