

УДК 541.123.3:543.572.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ РАВНОВЕСИЙ В ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ВЗАИМНОЙ СИСТЕМЕ K^+ , $Ba^{2+}||Br^-$, MoO_4^{2-}

© 2021 г. Е. Г. Данилушкина¹, *, И. К. Гаркушин¹, Н. С. Тарасова¹¹ Самарский государственный технический университет, главный корпус,
ул. Молодогвардейская, 244, Самара, 443100 Россия

*e-mail: e_danilu@mail.ru

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 05.08.2021 г.

Принята к публикации 18.08.2021 г.

С использованием термодинамического метода проведено разбиение трехкомпонентной взаимной системы K^+ , $Ba^{2+}||Br^-$, MoO_4^{2-} на стабильные симплексы, определены стабильные секущие системы, рассчитан тепловой эффект реакции обмена в точке конверсии. Описаны фазовые равновесия, химическое взаимодействие в системе и разграничены поля кристаллизации фаз. С целью подтверждения теоретического разбиения проведено экспериментальное исследование двух стабильных секущих и трех стабильных элементов трехкомпонентной взаимной системы K^+ , $Ba^{2+}||Br^-$, MoO_4^{2-} методом дифференциального термического анализа. В результате экспериментальных исследований установлено, что система относится к сингулярной необратимо-взаимной с эвтектическим типом плавления. Система разбивается стабильными секущими диагоналями на четыре стабильных фазовых треугольника $KBr-D_2-K_2MoO_4$, $KBr-D_2-BaMoO_4$, $KBr-D_1-BaMoO_4$, $BaBr_2-D_1-BaMoO_4$ (где $D_1 = 2KBr \cdot BaBr_2$, $D_2 = K_2MoO_4 \cdot BaMoO_4$). Данные разбиения подтверждены РФА. На стабильных секущих выявлены перевальные квазидвойные эвтектические точки: e_7 (727°C) и e_6 (608°C). Определены координаты (температура плавления, состав) трех тройных эвтектических точек: E_1 (597°C), E_2 (606°C), E_3 (602°C) и тройной перитектической точки P_1 (613°C). Максимальное поле кристаллизации на квадрате составов отвечает тугоплавкому молибдату бария.

Ключевые слова: фазовые равновесия, дифференциальный термический анализ, фазовая диаграмма, эвтектика, перитектика

DOI: 10.31857/S0002337X21120046

ВВЕДЕНИЕ

Композиции из неорганических солей находят применение в качестве функциональных материалов в большом количестве технологических процессов. В первую очередь это электролиты различного назначения, рабочие тела тепловых аккумуляторов, работающих при высоких температурах, флюсы для сварки и пайки, а также среды для проведения химических реакций [1–5]. Ионные расплавы щелочных полимолибдатов используют для синтеза и выращивания многих монокристаллов целевого назначения [6, 7]. Среди неорганических солей наиболее востребованы в технологическом отношении соли галогенидов, молибдатов, сульфатов *s*-элементов [8–14]. Выбор солевой смеси с требуемыми характеристиками неразрывно связан с изучением многокомпонентных систем [15].

Цель данной работы – исследование трехкомпонентной взаимной системы из бромидов и молибдатов калия и бария (K^+ , $Ba^{2+}||Br^-$, MoO_4^{2-}).

Данные по исходным соединениям приведены в табл. 1 [16, 17].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Исследование трехкомпонентной взаимной системы K^+ , $Ba^{2+}||Br^-$, MoO_4^{2-} проведено с целью установления фазовых равновесий и нахождения неинвариантных составов. Трехкомпонентная взаимная система включает четыре составляющих соли (рис. 1), образующие четыре двухкомпонентные системы, которые исследованы ранее [18–21].

Система $KBr-K_2MoO_4$ характеризуется образованием эвтектики (e_9) с координатами 610°C, 55.4% KBr , 44.6% K_2MoO_4 (трехфазное равновесие $J_{e4} \rightleftharpoons KBr + K_2MoO_4$ [18, 19])¹.

В системе $K_2MoO_4-BaMoO_4$ образуются соединения инконгруэнтного плавления K_2MoO_4 :

¹ Здесь и далее составы выражены в экв. %.

Таблица 1. Термодинамические и термические данные исходных солей [16, 17]

Вещество	$\Delta_f H_{298}^\circ$, кДж/моль	$\Delta_f G_{298}^\circ$, кДж/моль	$t_{пл}$, °С	Температура полиморфных переходов
KBr (кI, куб.)	-393.480	-380.108	734 ± 1	—
BaBr ₂ (к, ромб.)	-756.490	-732.263	857 ± 2	—
K ₂ MoO ₄ (кIV, монокл.)	-1498.457	-1381.481	926 ± 1	476 ± 10 (β/α) 450 ± 5 (β/γ) 316 ± 10 (δ/γ)
BaMoO ₄ (к, тетр.)	-1533.372	-1427.709	1458 ± 3	—

·BaMoO₄ (*D*₂) при температуре 1067°С и 51% K₂MoO₄, 49% BaMoO₄, а также эвтектика (*e*₅) при температуре 924°С и 95% K₂MoO₄, 5% BaMoO₄. При 3 экв. % BaMoO₄ и температуре плавления смеси 936°С в ликвидусе отмечается максимум, отвечающий граничному твердому раствору на основе α-K₂MoO₄ [20].

В системе BaBr₂–BaMoO₄ температура плавления эвтектики 758°С (*e*₁), состав 85% BaBr₂, 15% BaMoO₄. Эвтектическому составу соответствует инвариантное равновесие $ж \rightleftharpoons BaBr_2 + BaMoO_4$ [20, 21].

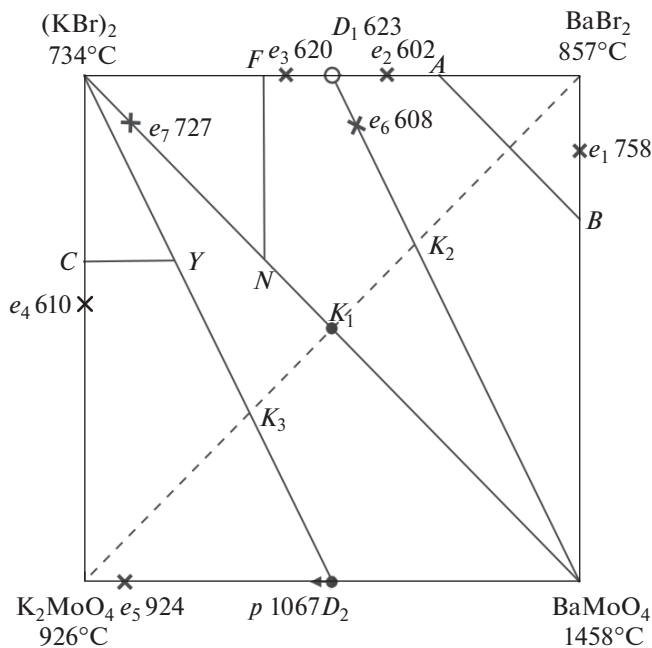


Рис. 1. Расположение политермических разрезов в тройной взаимной системе K^+ , $Ba^{2+}||Br^-$, MoO_4^{2-} .

Система KBr–BaBr₂ характеризуется образованием конгруэнтного соединения 2KBr·BaBr₂ (*D*₁) при температуре 623°С и 50% KBr, 50% BaBr₂, эвтектики (*e*₂) при температуре 602°С и 31% KBr, 69% BaBr₂, эвтектики (*e*₃) при температуре 620°С и 61% KBr, 39% BaBr₂ [18].

На первом этапе было проведено теоретическое разбиение системы на симплексы. Для подтверждения варианта разбиения проведен термодинамический расчет $\Delta_r H^\circ$ и $\Delta_r G^\circ$ реакции в точке конверсии по данным $\Delta_f H^\circ$ и $\Delta_f G^\circ$ исходных веществ [16, 17].

В точке *K*₂ (рис. 1) протекает реакция обмена



для состава которой рассчитаны тепловой эффект и энергия Гиббса реакции в точке конверсии ($\Delta_r H^\circ = -63.01$ кДж; $\Delta_r G^\circ = -110.30$ кДж). Система относится к сингулярной необратимо-взаимной по классификации Бергмана [22–25] со стабильной диагональю KBr–BaMoO₄.

Наличие соединений конгруэнтного плавления 2KBr·BaBr₂ (*D*₁) и инконгруэнтного плавления K₂MoO₄·BaMoO₄ (*D*₂) с учетом стабильной диагонали KBr–BaMoO₄ позволяет провести разбиение системы K, Ba||Br, MoO₄ на четыре симплекса: KBr–*D*₂–K₂MoO₄, KBr–*D*₂–BaMoO₄, KBr–*D*₁–BaMoO₄, BaBr₂–*D*₁–BaMoO₄.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследования проводили методом дифференциального термического анализа (ДТА), датчик температуры – комбинированная Pt–Pt/Rh(10% Rh)-термопара, индифферентное вещество – свежeproкаленный Al₂O₃. Исходные реактивы квалификаций “х. ч.” (KBr, BaBr₂, K₂MoO₄, BaMoO₄) были предварительно обезвожены. Температуры плавления веществ KBr, BaBr₂, K₂MoO₄ соответ-

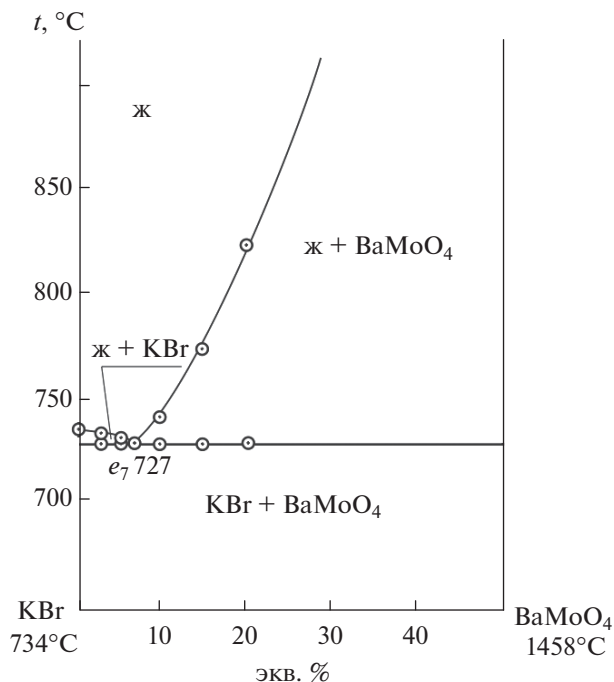


Рис. 2. t - x -диаграмма стабильной диагонали $\text{KBr}-\text{BaMoO}_4$.

ствовали справочным данным. Температура плавления BaMoO_4 принята равной 1458°C [16, 17]. Исследования проводили в платиновых микротиглях. Масса навесок составляла 0.4 г.

Для экспериментального подтверждения выбранного варианта разбиения трехкомпонентной взаимной системы K^+ , $\text{Ba}^{2+}\|\text{Br}^-$, MoO_4^{2-} системы на симплексы проведено исследование методом ДТА квазибинарной системы $\text{KBr}-\text{BaMoO}_4$. t - x -диаграмма стабильной диагонали $\text{KBr}-\text{BaMoO}_4$ представлена на рис. 2. Ветви первичной кристаллизации бромида калия и молибдата калия сходятся в квазидвойной эвтектической точке e_7 : 727°C , 7% BaMoO_4 ($\text{ж}_{e_7} \rightleftharpoons \text{KBr} + \text{BaMoO}_4$). Таким образом, квазибинарная система $\text{KBr}-\text{BaMoO}_4$ является стабильной диагональю трехкомпонентной взаимной системы, разбиение выполнено верно.

Проведен рентгенофазовый анализ образца смеси, отвечающего точке конверсии K_2 . Для этого образец, содержащий смесь 50% $\text{BaBr}_2 + 50\%$ K_2MoO_4 , нагрели до температуры $525-540^\circ\text{C}$, выдержали 30 мин, а затем закалили в лед. По результатам РФА, в образце кристаллизуются две фазы – KBr и BaMoO_4 , что также подтверждает теоретический вариант разбиения системы термодинамическим методом.

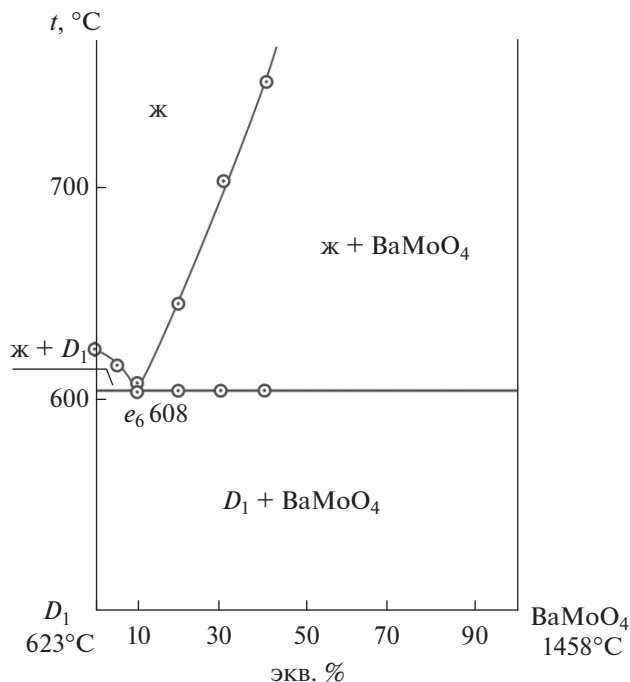


Рис. 3. t - x -диаграмма квазибинарной системы $D_1-\text{BaMoO}_4$.

Также для подтверждения разбиения системы с помощью ДТА изучена стабильная секущая, являющаяся квазибинарной системой $D_1-\text{BaMoO}_4$ (рис. 3).

Ветви первичной кристаллизации соединения конгруэнтного типа плавления и молибдата бария сходятся в квазидвойной эвтектической перекрестной точке e_6 (608°C , 10% BaMoO_4) с трехфазным равновесием $\text{ж}_{e_6} \rightleftharpoons D_1 + \text{BaMoO}_4$.

Для экспериментального изучения тройной взаимной системы проекционно-термографическим методом [25] рассмотрены политермические разрезы AB , NF , CY . В стабильном треугольнике $D_1-\text{BaBr}_2-\text{BaMoO}_4$ (рис. 1) выбран и исследован политермический разрез AB в поле кристаллизации бромида бария. t - x -диаграмма разреза представлена на рис. 4. Установлено наличие третичной кристаллизации с тройной эвтектикой E_1 ($t_{E_1} = 597^\circ\text{C}$). Пересечением ветвей вторичной кристаллизации бромида калия, молибдата бария и эвтектической прямой в точке \bar{E}_1 определили проекцию тройной эвтектики на плоскость разреза AB с постоянным соотношением компонентов KBr и BaMoO_4 . На разрезе $\text{BaBr}_2-\bar{E}_1-E_1$ (рис. 5), исходящем из вершины BaBr_2 , определены координаты тройной эвтектической точки E_1 : 597°C , 65% BaBr_2 , 32% KBr , 3% BaMoO_4 .

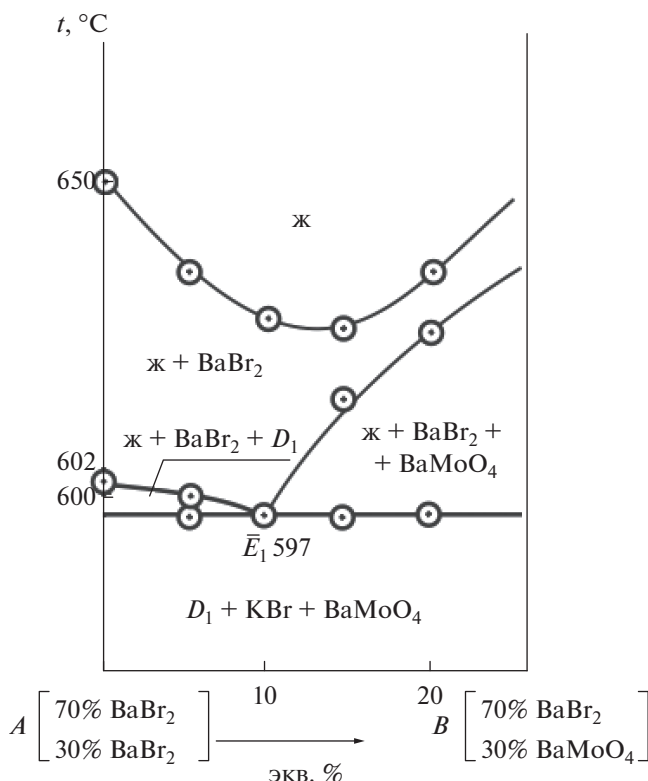


Рис. 4. t - x -диаграмма политермического разреза AB квазитройной системы KBr – $BaBr_2$ – $BaMoO_4$.

Ликвидус квазитройной системы D_1 – $BaBr_2$ – $BaMoO_4$ представлен пятью полями кристаллизации компонентов $BaBr_2$, $2KBr \cdot BaBr_2$ (D_1) и $BaMoO_4$. Наибольшее поле принадлежит молибдату бария.

Для нахождения инвариантной точки в симплексе KBr – D_1 – $BaMoO_4$ (рис. 1) экспериментально изучен политермический разрез NF , расположенный в поле кристаллизации бромида калия. По экспериментальным данным политермического сечения (рис. 6) определена температура плавления эвтектической точки и соотношение в ней компонентов $BaBr_2$ и $BaMoO_4$.

Изучением инвариантного разреза KBr – \bar{E}_2 – E_2 , исходящего из вершины бромида калия, через найденное направление \bar{E}_2 определены координаты тройной эвтектической точки E_2 : $606^\circ C$, 57% KBr , 40.5% $BaBr_2$, 2.5% $BaMoO_4$ (рис. 7). Ликвидус квазитройной системы KBr – D_1 – $BaMoO_4$ представлен тремя полями кристаллизации компонентов $D_1 = 2KBr \cdot BaBr_2$, KBr и $BaMoO_4$. Наибольшее поле принадлежит бромиду калия.

Аналогичное исследование провели и в симплексе KBr – K_2MoO_4 – $BaMoO_4$ (рис. 1), в котором изучен политермический разрез SU (S – 60% KBr ,

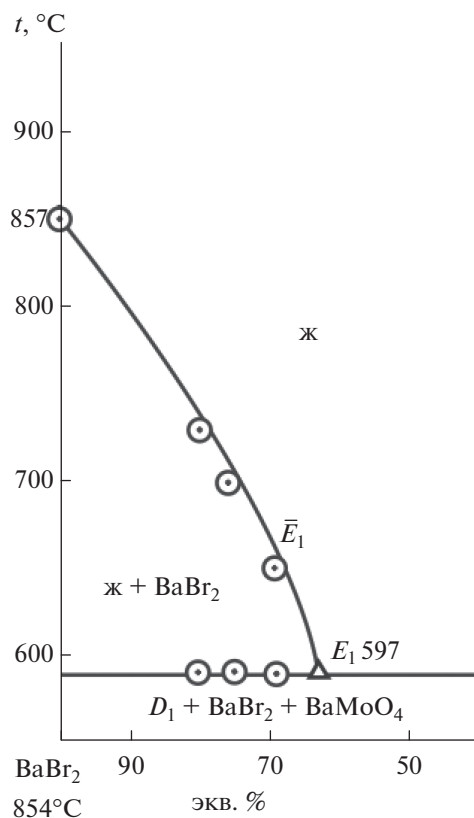


Рис. 5. t - x -диаграмма инвариантного разреза KBr – E_1 квазитройной системы KBr – $BaBr_2$ – $BaMoO_4$.

40% K_2MoO_4 ; Y – 60% KBr , 40% $BaMoO_4$), расположенный в поле кристаллизации бромида калия (рис. 8).

На разрезе SU были определены температуры плавления тройных эвтектики (E_3) и перитектики (P) и соотношение в них компонентов KBr и $BaMoO_4$ (\bar{E}_3 и \bar{P}_1). Составы эвтектики E_3 и перитектики P выявлены при исследовании разрезов KBr – \bar{E}_3 – E_3 (рис. 9) и KBr – \bar{P} – P соответственно:

E_3 – $602^\circ C$, 36% KBr , 60% K_2MoO_4 , 4% $BaMoO_4$. Для тройного эвтектического состава экспериментально определена энтальпия плавления: $\Delta H_m(E_3) = 24.48$ кДж/кг.

P_1 – $613^\circ C$, 60% KBr , 33% K_2MoO_4 , 7% $BaMoO_4$.

Все найденные инвариантные точки нанесены на квадрат составов системы K^+ , $Ba^{2+}||Br^-$, MoO_4^{2-} (рис. 10).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам экспериментальных исследований установлено, что трехкомпонентная вза-

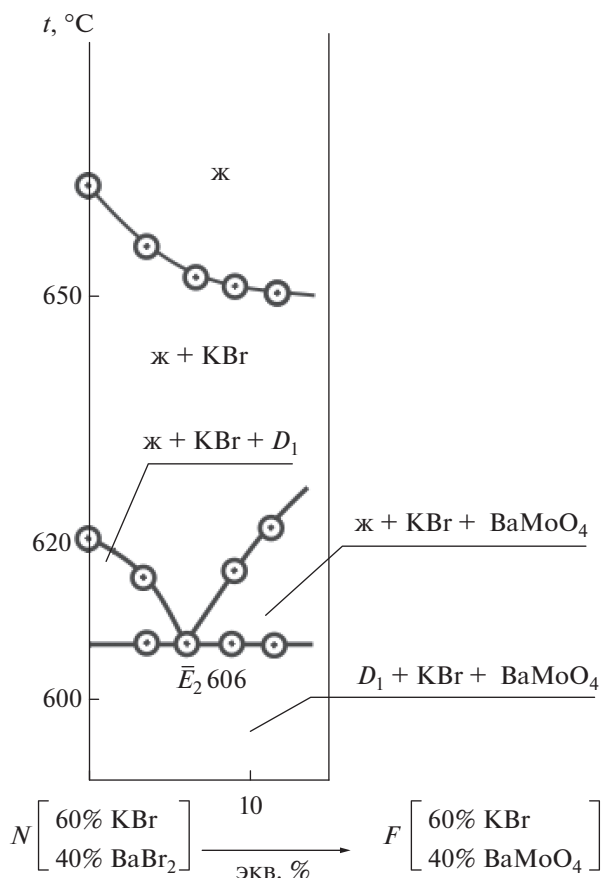


Рис. 6. t - x -диаграмма политермического разреза NF квазитройной системы $KBr-BaBr_2-BaMoO_4$.

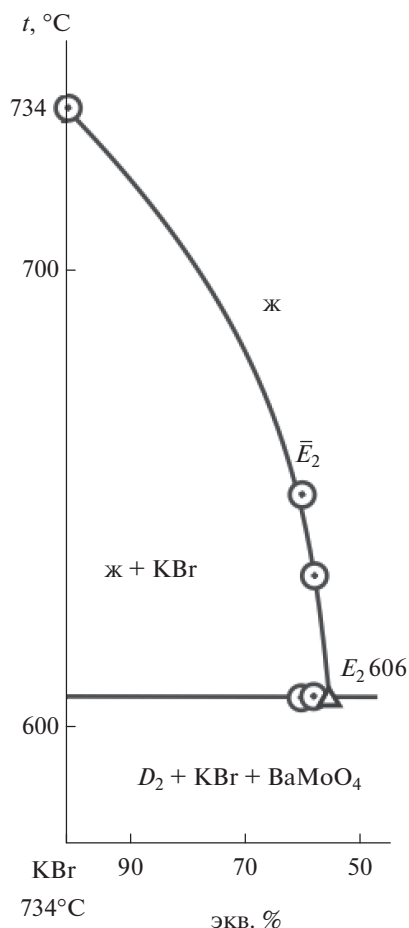


Рис. 7. t - x -диаграмма невариантного разреза $BaBr_2-E_2$ квазитройной системы $KBr-BaBr_2-BaMoO_4$.

имная система $K^+, Ba^{2+}||Br^-, MoO_4^{2-}$ разбивается тремя стабильными секущими $KBr-BaMoO_4$, $D_1-BaMoO_4$, D_2-KBr на четыре стабильных фазовых треугольника: $KBr-D_2-K_2MoO_4$, $KBr-D_2-BaMoO_4$, $KBr-D_1-BaMoO_4$, $BaBr_2-D_1-BaMoO_4$ ($D_1 = 2KBr \cdot BaBr_2$, $D_2 = K_2MoO_4 \cdot BaMoO_4$). Данные разбиения подтверждены РФА. Максимальное поле кристаллизации на квадрате составов отвечает тугоплавкому молибдату бария, оттесняющему поля кристаллизации остальных фаз.

Фазовые равновесные состояния для различных элементов квадрата составов приведены в табл. 2.

В системе, кроме реакций обмена в точке K_1 , протекают и реакции образования двойных соединений $2KBr \cdot BaBr_2$ (K_2BaBr_4 , D_1) и $K_2MoO_4 \cdot BaMoO_4$ (K_2BaMoO_4 , D_2):

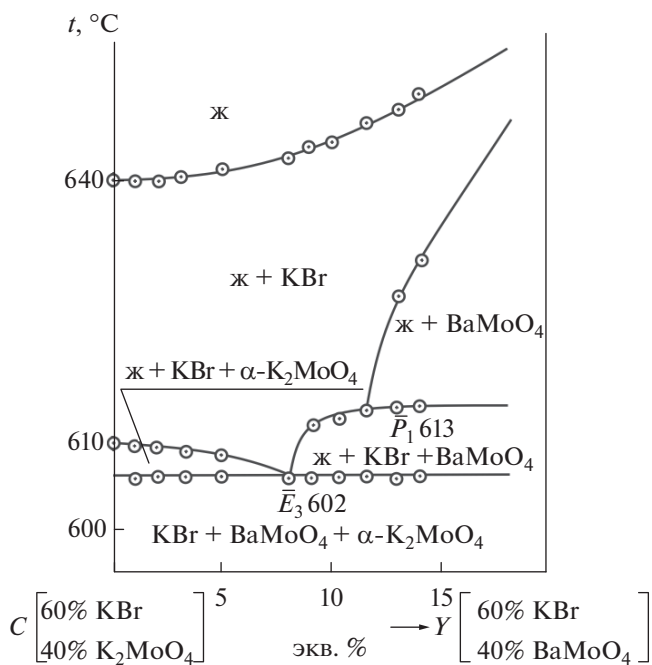
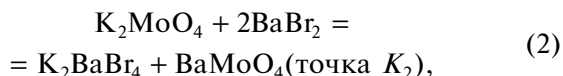


Рис. 8. t - x -диаграмма политермического разреза CY квазитройной системы $KBr-K_2MoO_4-BaMoO_4$.

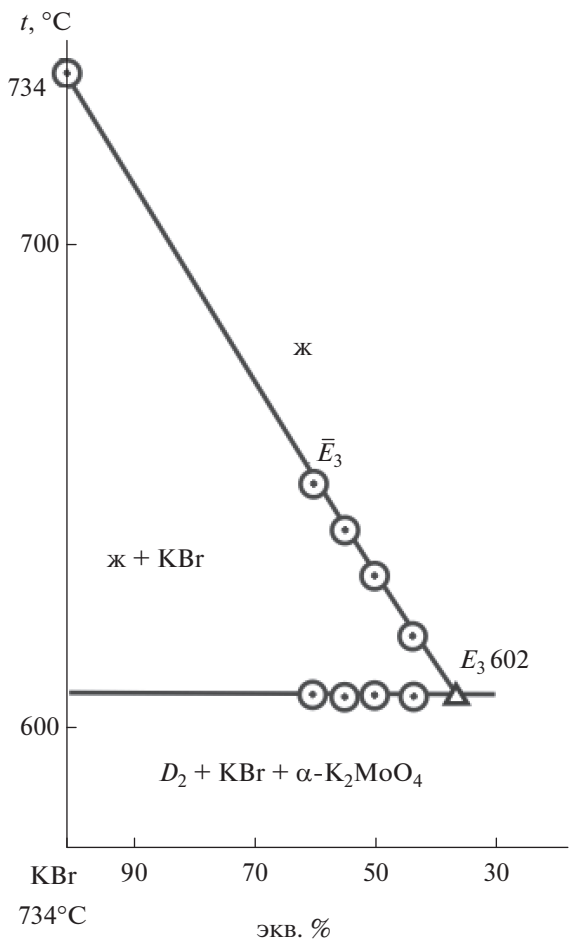


Рис. 9. t - x -диаграмма невариантного разреза квазитройной системы $\text{KBr}-\text{K}_2\text{MoO}_4-D_2$.

Таблица 2. Фазовые равновесные состояния для различных элементов квадрата составов

Элемент диаграммы	Фазовое равновесие
Дивариантные равновесия	
Поле $e_1E_1e_2$	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{BaBr}_2$
Поле $e_2E_1e_6E_2e_3$	$\text{ж} \rightleftharpoons D_1$
Поле $e_3E_2e_7P_1E_3e_4$	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{KBr}$
Поле $e_4E_3e_5$	$\text{ж} \rightleftharpoons \alpha\text{-K}_2\text{MoO}_4$
Поле $e_5E_3P_1p_2$	$\text{ж} \rightleftharpoons D_2$
Поле $p_2P_1e_7E_2e_6E_1e_1$	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{BaMoO}_4$
Моновариантные равновесия	
Линия e_1-E_1	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{BaBr}_2 + \text{BaMoO}_4$
Линия e_2-E_1	$\text{ж} \rightleftharpoons D_1 + \text{BaBr}_2$
Линия e_6-E_1	$\text{ж} \rightleftharpoons D_1 + \text{BaMoO}_4$
Линия e_6-E_2	$\text{ж} \rightleftharpoons D_1 + \text{BaMoO}_4$
Линия e_3-E_2	$\text{ж} \rightleftharpoons D_1 + \text{KBr}$
Линия e_7-E_2	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{BaMoO}_4 + \text{KBr}$
Линия e_7-P_1	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{BaMoO}_4 + \text{KBr}$
Линия p_1-P_1	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{BaMoO}_4 + D_2$
Линия E_3-P_1	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{KBr} + D_2$
Линия e_4-E_3	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{KBr} + \alpha\text{-K}_2\text{MoO}_4$
Линия e_5-E_3	$\text{ж} \rightleftharpoons D_2 + \alpha\text{-K}_2\text{MoO}_4$
Нонвариантные равновесия	
Точка E_1	$\text{ж} \rightleftharpoons D_1 + \text{BaBr}_2 + \text{BaMoO}_4$
Точка E_2	$\text{ж} \rightleftharpoons D_1 + \text{BaMoO}_4 + \text{KBr}$
Точка E_3	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{KBr} + D_2 + \alpha\text{-K}_2\text{MoO}_4$
Точка P_1	$\text{ж} \rightleftharpoons D_2 + \text{BaMoO}_4 + \alpha\text{-K}_2\text{MoO}_4$

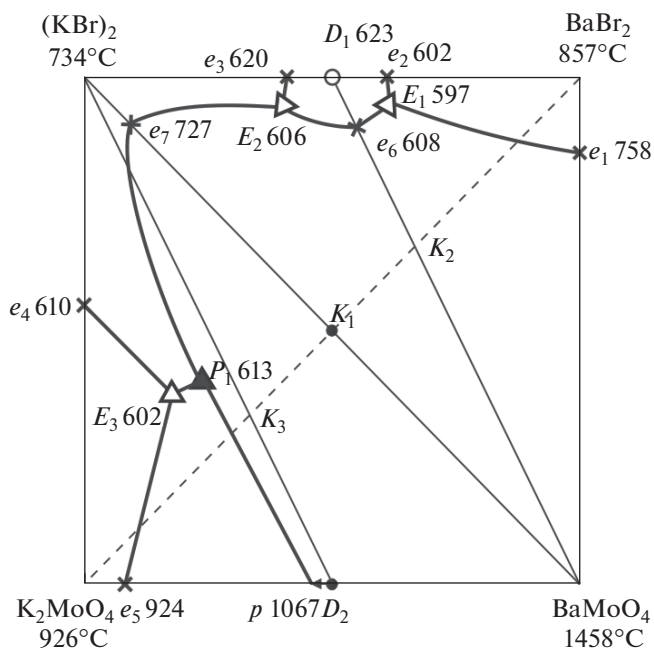
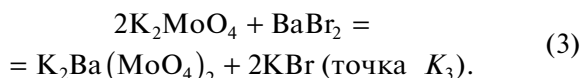


Рис. 10. Квадрат составов системы $\text{K}^+, \text{Ba}^{2+}||\text{Br}^-, \text{MoO}_4^{2-}$.



Для составов, расположенных на участке диагонали BaBr_2-K_2 , из приведенных реакций реализуется реакция (2) – образование соединения K_2BaBr_4 , которое с BaBr_2 и BaMoO_4 образует симплекс $\text{K}_2\text{BaBr}_4-\text{BaBr}_2-\text{BaMoO}_4$. Составы на нестабильной диагонали между точками K_2 и K_1 характеризуются протеканием реакций (2) и (1), в результате которых из расплава кристаллизуются три фазы: KBr , K_2BaBr_4 и BaMoO_4 . Составы между точками K_1 и K_3 характеризуются протеканием реакций (1) и (3), в результате которых после кристаллизации из расплава образуются три твердые фазы стабильного треугольника $\text{KBr}-\text{BaMoO}_4-\text{K}_2\text{Ba}(\text{MoO}_4)_2 (D_2)$. А на последнем участке диагонали $K_3-\text{BaMoO}_4$ в смесях после расплавления и кристаллизации образуются три твердые фазы:

KBr, K_2MoO_4 и $K_2Ba(MoO_4)_2$, т.е. протекает только реакция (3).

БЛАГОДАРНОСТЬ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губанова Т.В., Афанасьева А.Д., Бузгон Е.А., Гаркушин И.К. Трехкомпонентные системы $NaF-NaVO_3-Na_2CrO_4$ ($\Gamma = Cl, Br$) // Журн. неорган. химии. 2018. Т. 63. № 2. С. 257–260. <https://doi.org/10.7868/S0044457X1802019>
2. Данилова В.П., Фролова Е.А., Кондаков Д.Ф., Свешникова Л.Б. Применение физико-химического анализа при разработке и исследовании противогололедных реагентов // Журн. неорган. химии. 2019. Т. 64. № 9. С. 984–987. <https://doi.org/10.1134/S0044457X1909006X>
3. Гаркушин И.К., Дворянова Е.М., Губанова Т.В., Фролов Е.И., Истомова М.А., Гаркушин А.И. Функциональные материалы на основе многокомпонентных солевых систем // Журн. неорган. химии. 2015. Т. 60. № 3. С. 374–391. <https://doi.org/10.7868/S0044457X14120095>
4. Вердиев Н.Н., Гаркушин И.К., Бурчаков А.В., Вердиева З.Н., Алхасов А.Б., Мусаева П.А., Кондратюк И.М., Егорова Е.М. Фазовые равновесия в системе $NaF-NaCl-NaBr-Na_2CrO_4$ // Неорган. материалы. 2020. Т. 56. № 11. С. 1243–1251. <https://doi.org/10.31857/S0002337X20110159>
5. Гаркушин И.К., Егорцев Г.Е., Истомова М.А. Поиск электролитов для химических источников тока на основе древ фаз (древ кристаллизации) солевых систем // Электрохимическая энергетика. 2009. Т. 9. № 2. С. 95–109.
6. Дробашева Т.И., Снежков В.И., Расторопов С.Б. Ионные расплавы поливольфрамов, молибдатов щелочных металлов и их применение для выращивания кристаллов целевого назначения // Современные наукоемкие технологии. 2011. № 5. С. 69–70.
7. Базарова Ж.Г., Логвинова А.В., Базаров Б.Г. Фазообразование в системах $Rb_2MoO_4-R_2(MoO_4)_3-Zr_2(MoO_4)_2$ ($R = Al, Fe, Cr, Y$) // Неорганические материалы. 2020. Т. 56. № 12. С. 1350–1355. <https://doi.org/10.31857/S0002337X20120040>
8. Фролов Е.И., Губанова Т.В. Многокомпонентные системы $LiCl-LiBr-Li_2SO_4$ и $LiCl-LiBr-Li_2SO_4-Li_2MoO_4$ // Журн. неорган. химии. 2017. Т. 62. № 11. С. 1521–1524. <https://doi.org/10.1134/S0036023617110079>
9. Гаркушин И.К., Рагрина М.С., Сухаренко М.А. Исследование стабильного тетраэдра четырехкомпонентной взаимной системы $Na, K, Cs\|F, Cl$ // Журн. неорган. химии. 2018. Т. 63. № 1. С. 94–98. <https://doi.org/10.7868/S0044457X18010130>
10. Ushak S., Fernández A.G., Grageda M. Using Molten Salts and Other Liquid Sensible Storage Media in Thermal Energy Storage (TES) Systems // Advances in Thermal Energy Storage Systems. 2015. P. 49–63.
11. Егорова Е.М., Игнатъева Е.О., Гаркушин И.К., Кондратюк И.М. Изучение фазовых равновесий в трехкомпонентной взаимной системе $Na, K\|I, MoO_4$ // Журн. неорган. химии. 2018. Т. 63. № 5. С. 645–649. <https://doi.org/10.7868/S0044457X18050185>
12. Вердиев Н.Н., Бабаев Б.Д., Гасаналиев А.М. Фазовые равновесия в системах $Li, Na, Ba\|MoO_4$ и $Li, Ca, Ba\|MoO_4$ // Журн. неорган. химии. 1996. Т. 41. № 2. С. 309–312.
13. Химические источники тока: справочник / Под ред. Коровина Н.В., Скундина А.М. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 740 с.
14. Быстров В.П., Ливчак А.В. Теплоаккумуляторы с использованием фазового перехода // Вопросы экономики теплоэнергетич. ресурсов в системах вентиляции и теплоснабжения. Сб. науч. тр. М.: Изд. ЦНИИЭПИО, 1984.
15. Гаркушин И.К., Кондратюк И.М., Егорцев Г.Е., Истомова М.А. Теоретические и экспериментальные методы исследования многокомпонентных систем: уч. пособие. Самара: СамГТУ, 2012. 125 с.
16. Термические константы веществ. Справочник / Под ред. Глушко В.П. М.: ВИНТИ, 1981. Вып. X. Ч. 1. 300 с.
17. Термические константы веществ. Справочник / Под ред. Глушко В.П. М.: ВИНТИ, 1981. Вып. X. Ч. 2. 440 с.
18. Посытайко В.И., Алексеева Е.А., Васина Н.А. Диаграммы плавкости солевых систем: Ч. III. Двойные системы с общим катионом. Справочник. М.: Металлургия, 1979. 78 с.
19. Воскресенская Н.К., Евсеева Н.Н., Беруль С.И. и др. Справочник по плавкости систем из безводных неорганических солей. М.: Изд-во АН СССР, 1961. Т. 1. 845 с.
20. Гасаналиев А.М., Трунин А.С., Дибиров М.А. Система $K_2MoO_4-CaMoO_4-BaMoO_4$ // Журн. неорган. химии. 1979. Т. 24. № 6. С. 1716–1718.
21. Данилушкина Е.Г., Гаркушин И.К., Рыжкова Д.С. Исследование трехкомпонентной взаимной системы $Na, Ba\|Br, MoO_4$ // Журн. неорган. химии. 2019. Т. 64. № 8. С. 881–888. <https://doi.org/10.1134/S0044457X19080038>
22. Бергман А.Г., Бухалова Г.А. Термодинамические взаимоотношения в тройных взаимных системах с комплексобразованием // Изв. сектора физ.-хим. анализа. 1952. Т. 21. С. 228–249.
23. Васина Н.А., Грызлова Е.С., Шапошникова С.Г. Теплофизические свойства многокомпонентных солевых систем. М.: Химия, 1984. 99 с.
24. Лупейко Т.Г., Тарасов Н.И., Зяблин В.Н., Петров М.П. Новые возможности расчетов термодинамических характеристик солевых систем на основе их диаграмм плавкости. М. 2012. С. 90–94.
25. Космынин А.С., Трунин А.С. Проекционно-термографический метод исследования гетерогенных равновесий в конденсированных многокомпонентных системах // Тр. Самар. науч. школы по физ.-хим. анализу многокомпонентных систем. Т. 9. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2006. 183 с.