

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

УДК 541.123.3:543.572.3

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ВЗАИМНОЙ СИСТЕМЫ
Na, Ba||Br, MoO₄**

© 2019 г. Е. Г. Данилушкина¹, *, И. К. Гаркушин¹, Д. С. Рыжкова¹¹Самарский государственный технический университет, Россия, 443100 Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*E-mail: e_danilu@mail.ru

Поступила в редакцию 24.12.2018 г.

После доработки 08.02.2019 г.

Принята к публикации 15.02.2019 г.

Проведено теоретическое разбиение трехкомпонентной взаимной системы Na, Ba||Br, MoO₄ на симплексы, определена стабильная диагональ системы и рассчитан тепловой эффект реакции в точке конверсии. Описано химическое взаимодействие в системе и фазовые равновесия, разграничены поля кристаллизации фаз. Для подтверждения теоретического разбиения проведено экспериментальное исследование стабильной диагонали и двух стабильных элементов трехкомпонентной взаимной системы Na, Ba||Br, MoO₄ методом дифференциального термического анализа. Установлено, что система Na, Ba||Br, MoO₄ относится к сингулярной необратимо-взаимной с эвтектическим типом плавления. Система разбивается стабильной секущей диагональю NaBr–BaMoO₄ на два стабильных фазовых треугольника: NaBr–BaBr₂–Na₂MoO₄ и NaBr–BaMoO₄–Na₂MoO₄. Результаты разбиения подтверждены данными рентгенофазового анализа. На стабильной секущей выявлена перевальная квазидвойная эвтектическая точка e 721°C. Определены координаты (температура плавления, состав) двух тройных эвтектик: E_1 586°C и E_2 525°C. Максимальное поле кристаллизации на квадрате составов отвечает тугоплавкому молибдату бария.

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

DOI: 10.1134/S0044457X19080038

ВВЕДЕНИЕ

Большинство технологических процессов и конструирование изделий тесно связаны с использованием неорганических функциональных композиций на основе солей. Распространенными и важными в технологическом отношении являются соли галогенидов, молибдатов, сульфатов s -элементов [1–9]. Эти соединения востребованы в качестве сред для проведения химических реакций, электролитов различного назначения, флюсов для сварки и пайки, а также для рабочих тел тепловых аккумуляторов, работающих при высоких температурах [10–12], теплоносителей для отопительного оборудования жилых зданий [13]. Вследствие достаточно низкой вязкости и высокой теплопроводности расплавленные соли используются для теплообмена или охлаждения в различных системах, например, в солнечных электростанциях, находят применение при термообработке сталей [14]. Конструирование составов различного назначения тесно связано с изучением многокомпонентных систем [15].

Объектом исследования является трехкомпонентная взаимная система из бромидов и молиб-

датов натрия и бария Na, Ba||Br, MoO₄. Данные по исходным соединениям приведены в табл. 1 [16–18].

Трехкомпонентная взаимная система Na, Ba||Br, MoO₄ включает четыре составляющих вещества, образующих четыре двухкомпонентные системы, исследованные ранее [19–22].

Система BaBr₂–BaMoO₄ эвтектического типа с координатами эвтектики: 70 экв. % BaBr₂, 30 экв. % BaMoO₄, $t_{пл} = 758^\circ\text{C}$ (трехфазное равновесие $ж_{e1} \rightleftharpoons \text{BaBr}_2 + \text{BaMoO}_4$).

Система NaBr–BaBr₂ имеет координаты эвтектической точки: 58 экв. % NaBr, 42 экв. % BaBr₂, $t_{пл} = 594^\circ\text{C}$ (трехфазное равновесие $ж_{e2} \rightleftharpoons \text{NaBr} + \text{BaBr}_2$) [19, 20].

Система NaBr–Na₂MoO₄ эвтектического типа с трехфазным равновесием $ж_{e3} \rightleftharpoons \text{NaBr} + \beta\text{-Na}_2\text{MoO}_4$ при 535°C и 44 экв. % NaBr, 54 экв. % Na₂MoO₄ [21]. В ликвидусе системы отмечаются полиморфные превращения Na₂MoO₄ при 635 (δ/γ) и 585°C (γ/β). В солидусе во всем интервале концентраций отмечается полиморфное превращение β/α-Na₂MoO₄ при 451°C.

Таблица 1. Термодинамические и термические данные исходных солей [11, 12]

Вещество	$\Delta_r H_{298}^\circ$, кДж/моль	$\Delta_r G_{298}^\circ$, кДж/моль	$t_{пл}$, °С	Температура полиморфных переходов
NaBr (кI, куб.)	–361.192	–349.129	747 ± 2	–
BaBr ₂ (к, ромб.)	–756.490	–732.263	857 ± 2	–
Na ₂ MoO ₄ (кI, куб.)	–1469.002	–1355.147	688 ± 3	451 ± 5 (β/α) 585 ± 5 (β/γ) 635 ± 5 (δ/γ)
BaMoO ₄ (к, тетр.)	–1533.372	–1427.709	1458 ± 3	–

В системе Na₂MoO₄–BaMoO₄ отмечено образование эвтектики при 678°С и 95 экв. % Na₂MoO₄, 9.7 экв. % BaMoO₄ [22, 23] с фазовым равновесием $ж_{e4} \rightleftharpoons \alpha' + BaMoO_4$, где α' – граничный твердый раствор на основе δ -Na₂MoO₄.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

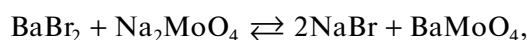
Объектом исследования является трехкомпонентная взаимная система из бромидов и молибдатов натрия и бария Na, Ba||Br, MoO₄. Экспериментальные исследования проводили методом дифференциального термического анализа (ДТА) [15, 24, 25]. Исходные реактивы квалификации “х. ч.” (NaBr, BaBr₂, Na₂MoO₄, BaMoO₄) были предварительно обезвожены. Температуры плавления веществ соответствовали справочным данным [16–18]. Кривые нагревания и охлаждения образцов снимали на установке ДТА, включающей печь нагрева шахтного типа, датчик термоэдс, комбинированную платина-платинородиевую термопару, АЦП (аналого-цифровой преобразователь), программатор нагрева (охлаждения). Термоаналитические исследования проводили в стандартных платиновых микротиглях. Холодные спаи термопар термостатировали при 0°С в сосуде Дьюара с тающим льдом. Скорость нагрева (охлаждения) образцов составляла 10–15 град/мин. В качестве индифферентного вещества использовали свежeproкаленный Al₂O₃ (ч. д. а.). Масса навесок составляла 0.4 г. Градуировку термопар проводили по температурам плавления и полиморфных превращений безводных неорганических солей [16–18]. Точность измерения температур составляла $\pm 2.5^\circ\text{C}$ при точности взвешивания 0.1% на электронных весах Adventurer Ohaus RV214. Составы – молярные массы эквивалентов, выраженные в процентах.

Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на дифрактометре ARL X'TRA (CuK_α-излучение) с использованием программных комплексов Crystallographica search-match и Siroquant.

Термодинамическое планирование и методика эксперимента

Проведено исследование трехкомпонентной взаимной системы Na, Ba||Br, MoO₄ с целью установления фазовых равновесий и нахождения точек, отвечающих невариантным составам системы.

В точке К (рис. 1) протекает реакция обмена:



для состава которой рассчитан тепловой эффект и энергия Гиббса реакции в точке конверсии

($\Delta_r H_{298}^\circ = -30.26$ кДж, $\Delta_r G_{298}^\circ = -38.56$ кДж). По классификации А.Г. Бергмана, основанной на расчете теплового эффекта реакции в точке конверсии, система относится к сингулярной необратимо-взаимной [26–28] со стабильной диагональю NaBr–BaMoO₄. Она разбивает квадрат составов системы на два стабильных фазовых треугольника: NaBr–BaBr₂–Na₂MoO₄ и NaBr–BaMoO₄–Na₂MoO₄.

Для подтверждения разбиения системы исследовано взаимодействие смеси эквивалентных количеств солей – молибдата натрия и бромида бария (рис. 2). Образец состава 50 экв. % BaBr₂ и 50 экв. % Na₂MoO₄ нагрели до 540°С, выдержали при этой температуре 30 мин, затем закалили во льду. По результатам РФА, в образце кристаллизуются две фазы – NaBr и BaMoO₄ (рис. 1), что также подтверждает теоретический вариант разбиения системы термодинамическим методом. Вариант разбиения подтвержден исследованием стабильной диагонали NaBr–BaMoO₄ (рис. 3), на которой определены температура плавления и содержание компонентов в квазидвойной эвтектической точке: 721°С, 11 экв. % BaMoO₄, 89 экв. % NaBr.

Для экспериментального изучения системы по правилам проекционно-термографического метода [29] в стабильном треугольнике NaBr–BaBr₂–BaMoO₄ выбран и исследован политермический разрез АВ (составы в поле кристаллизации

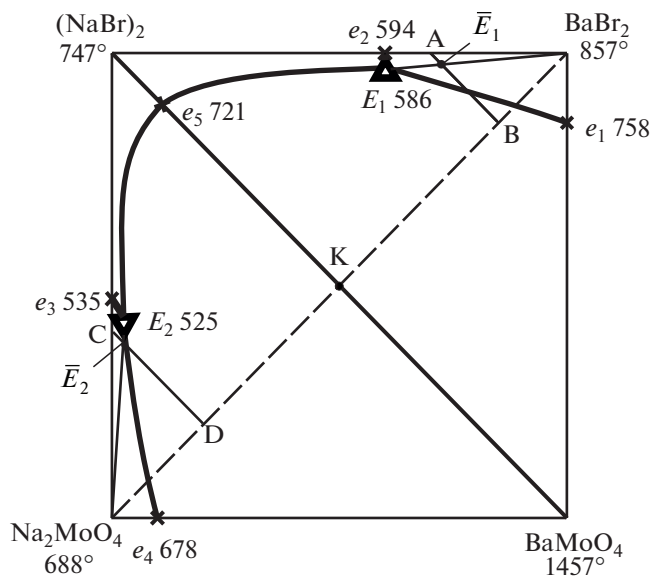


Рис. 1. Квадрат составов системы Na, Ba//Br, MoO₄.

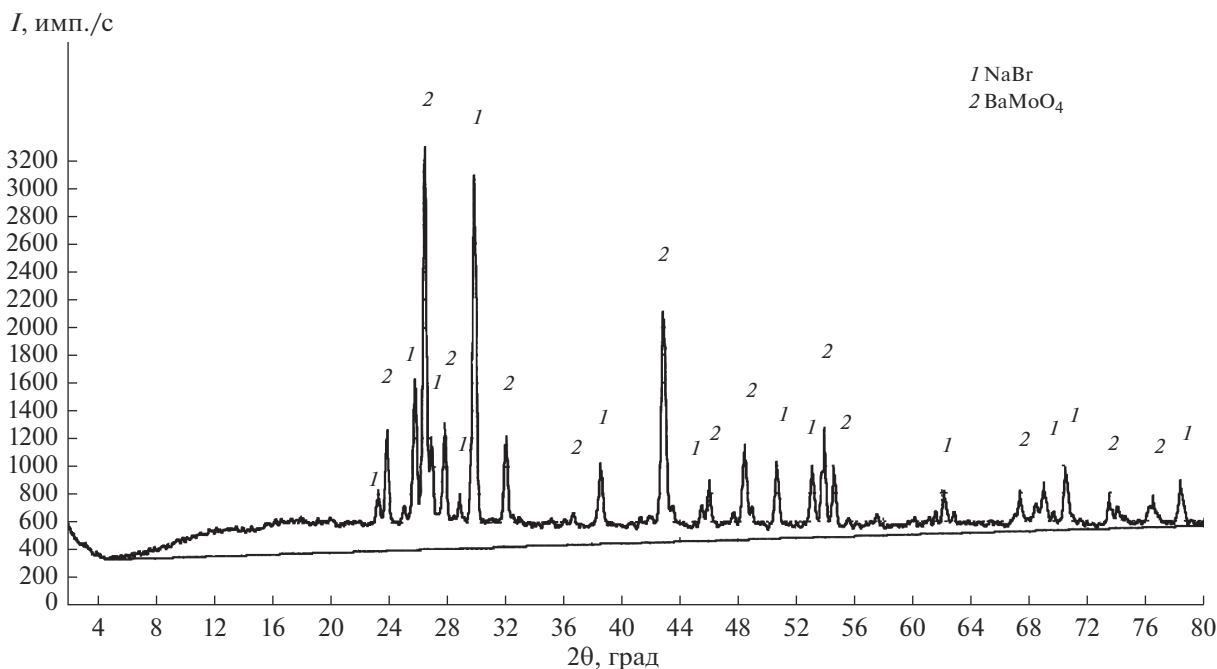


Рис. 2. Дифрактограмма продуктов реакции для состава в точке конверсии К.

бромиды бария, рис. 3). При изучении разреза установлено наличие третичной кристаллизации, соответствующей тройной эвтектике E_1 ($t_{E1} = 586^\circ\text{C}$). Пересечением ветвей вторичной кристаллизации молибдатов бария и бромида натрия с соответствующей эвтектической прямой в точке \bar{E}_1 определили проекцию тройной эвтектики на плоскость разреза АВ с постоянным соотношением компонентов NaBr и BaMoO₄ (рис. 4). Иссле-

дованием разреза BaBr₂ → \bar{E}_1 → E_1 (рис. 5), исходящего из вершины BaBr₂, найден состав тройной эвтектической точки E_1 : 586.60 экв. % BaBr₂, 37 экв. % NaBr и 3 экв. % BaMoO₄.

Аналогично проведено экспериментальное исследование стабильного треугольника NaBr–BaMoO₄–Na₂MoO₄. В результате исследования политермического разреза CD определена темпе-

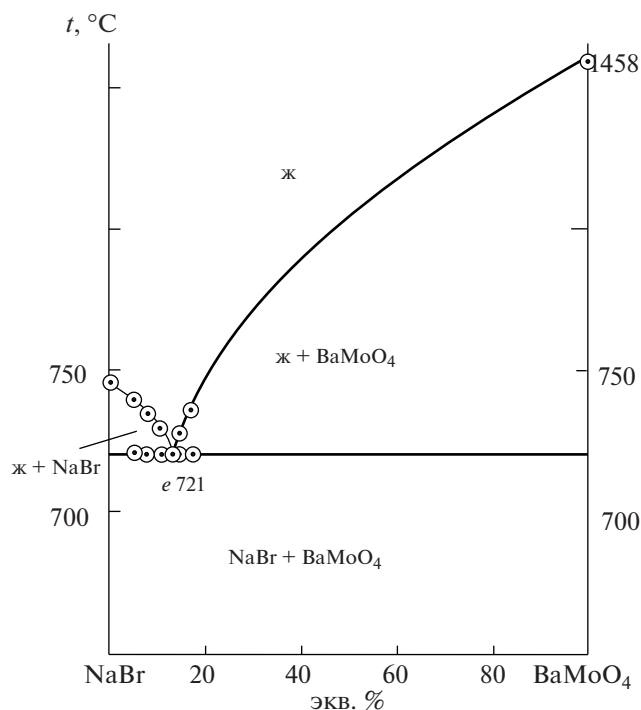


Рис. 3. Политермический разрез стабильной диагонали NaBr–BaMoO₄.

ратура плавления эвтектики E_2 ($t_{E_2} = 525^\circ\text{C}$), а также выявлено направление \bar{E}_2 на тройную эвтектическую точку (рис. 6) Исследованием разреза $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \rightarrow \bar{E}_2 \rightarrow E_2$, исходящего из вершины молибдата натрия и проходящего через найденное направление, определен состав тройной эвтектической точки: 53 экв. % Na_2MoO_4 + 42 экв. % NaBr + 5 экв. % BaMoO_4 (рис. 7).

Температуры плавления эвтектик E_1 и E_2 и невариантные равновесия приведены в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе экспериментальных исследований установлено, что система Na, Ba||Br, MoO₄ относится к сингулярной необратимо-взаимной с эвтектическим типом плавления.

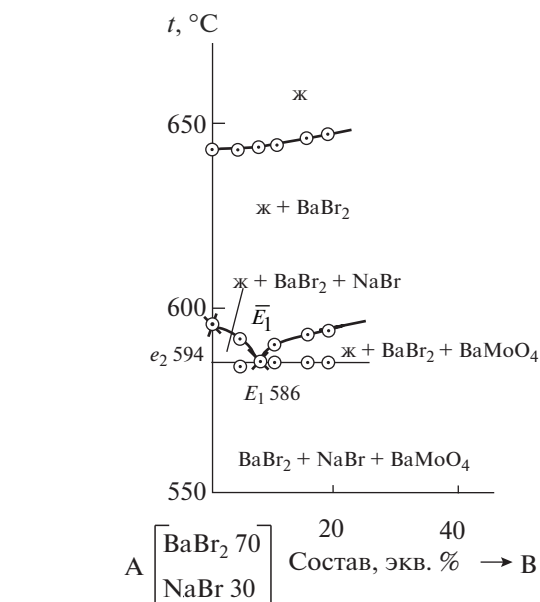


Рис. 4. Политермический разрез АВ.

Термохимические расчеты $\Delta_r H_{298}^\circ$ и $\Delta_r G_{298}^\circ$ реакции обмена для состава, отвечающего точке полной конверсии, исследование твердофазного взаимодействия смеси $\text{BaBr}_2 + \text{Na}_2\text{MoO}_4$, анализ продуктов взаимодействия методом РФА, а также исследование фазовой диаграммы квазибинарной системы NaBr–BaMoO₄ подтвердили вариант разбиения на два стабильных фазовых треугольника: NaBr–BaBr₂–Na₂MoO₄ и NaBr–BaMoO₄–Na₂MoO₄. На стабильной секущей выявлена перевальная квазидвойная эвтектическая точка e 721°C. Определены координаты (температура плавления, состав) двух тройных эвтектик: E_1 586°C и E_2 525°C и квазидвойной эвтектики e_2 721°C.

Максимальное поле из четырех полей кристаллизации на квадрате составов (рис. 3) отвечает тугоплавкому молибдату бария, отгесняющему поля кристаллизации остальных фаз к бинарным сторонам, что также является подтверждением сингулярного характера тройной взаимной системы. Фазовые равновесные состояния для раз-

Таблица 2. Характеристики точек невариантных равновесий в исследованных системах

Система	Характер точки	Содержание компонентов, экв. %			$t_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$
		1	2	3	
NaBr–BaMoO ₄	e	89	11	—	721
NaBr–BaBr ₂ –BaMoO ₄	E_1	37	60	3	586
NaBr–Na ₂ MoO ₄ –BaMoO ₄	E_2	42	53	5	525

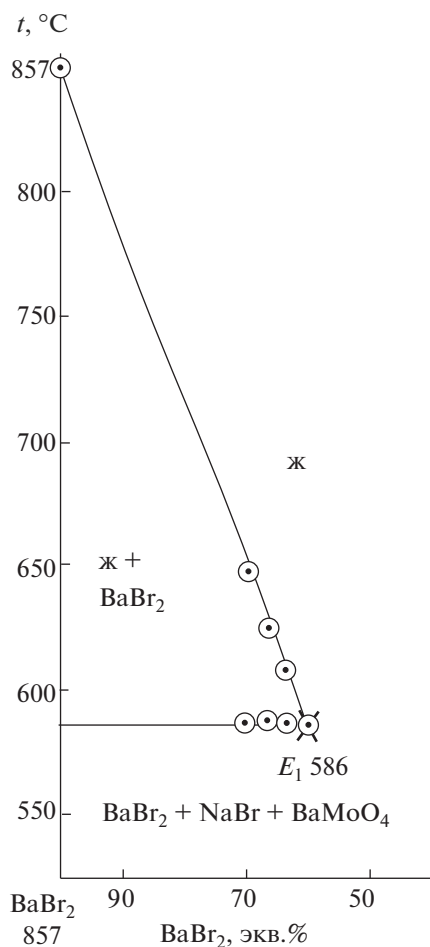


Рис. 5. Политермический разрез $\text{BaBr}_2 \rightarrow \bar{E}_1 \rightarrow E_1$.

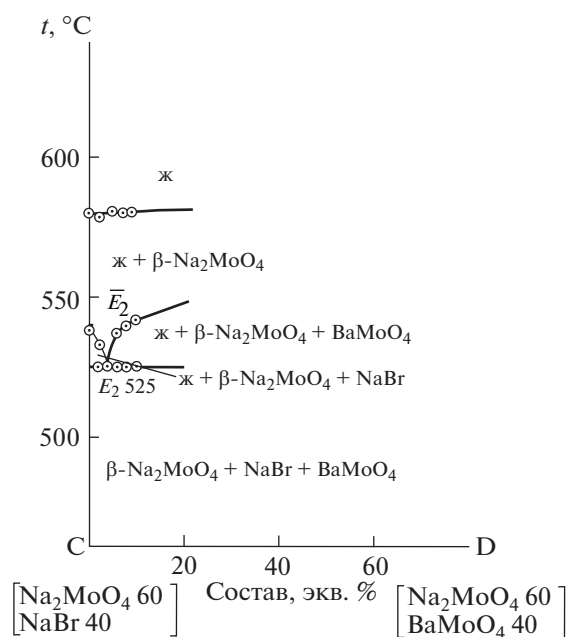


Рис. 6. Политермический разрез CD.

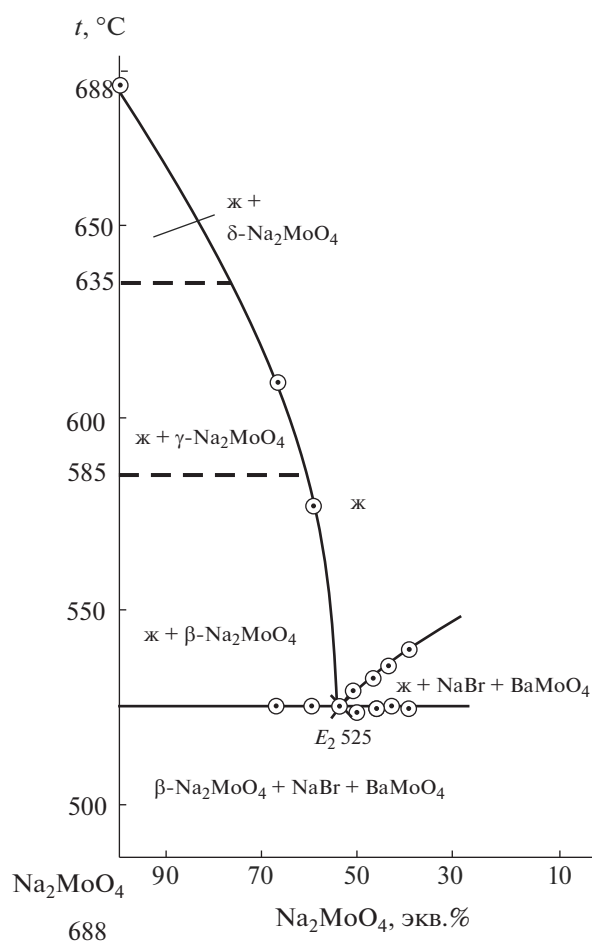


Рис. 7. Политермический разрез $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \rightarrow \bar{E}_2 \rightarrow E_2$.

Таблица 3. Фазовые равновесные состояния для различных элементов квадрата составов

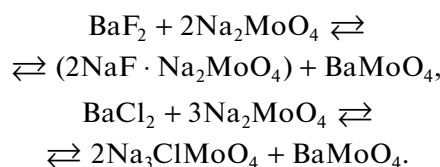
Элемент диаграммы	Фазовое равновесие
Дивариантные равновесия	
Поле $e_2E_1e_5E_2e_3$	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{NaBr}$
Поле $e_1E_1e_5E_2e_4$	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{BaMoO}_4$
Поле $e_1E_1e_2$	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{BaBr}_2$
Поле $e_3E_2e_4$	$\text{ж} \rightleftharpoons \beta\text{-Na}_2\text{MoO}_4$
Моновариантные равновесия	
Линия e_1-E_1	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{BaBr}_2\text{-BaMoO}_4$
Линия e_2-E_1	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{NaBr-BaBr}_2$
Линия e_5-E_1	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{NaBr-BaMoO}_4$
Линия e_5-E_2	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{NaBr-BaMoO}_4$
Линия e_3-E_2	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{NaBr-}\beta\text{-Na}_2\text{MoO}_4$
Линия e_4-E_2	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{BaMoO}_4\text{-}\beta\text{-Na}_2\text{MoO}_4$
Нонвариантные равновесия	
Точка E_1	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{NaBr-BaBr}_2\text{-BaMoO}_4$
Точка E_2	$\text{ж} \rightleftharpoons \text{NaBr-BaMoO}_4\text{-}\beta\text{-Na}_2\text{MoO}_4$

личных элементов квадрата составов приведены в табл. 3.

Имеющиеся в литературе данные по тройным взаимным системам $\text{Na, Ba} \parallel \text{F, MoO}_4$, $\text{Na, Ba} \parallel \text{Cl, MoO}_4$ [30] и исследованной в данной работе системе $\text{Na, Ba} \parallel \text{Br, MoO}_4$ позволяют сравнить топологию фазовых диаграмм (рис. 8). В двойных системах $\text{NaF-Na}_2\text{MoO}_4$ и $\text{NaCl-Na}_2\text{MoO}_4$ образуются соединения $2\text{NaF} \cdot \text{Na}_2\text{MoO}_4$ и $\text{Na}_3\text{ClMoO}_4$ инконгруэнтного и конгруэнтного типа плавления соответственно. Поэтому системы $\text{Na, Ba} \parallel \text{F(Cl), MoO}_4$ кроме основной стабильной диагонали NaF(Cl)-BaMoO_4 имеют секущие. Квадраты составов указанных систем имеют не четыре, а пять полей кристаллизации. Сравнение тепловых эффектов

реакций обмена систем $\text{Na, Ba} \parallel \text{F, MoO}_4$ ($\Delta_r H_{298}^\circ = -21.88$ кДж), $\text{Na, Ba} \parallel \text{Cl, MoO}_4$ ($\Delta_r H_{298}^\circ = -30.82$ кДж) и $\text{Na, Ba} \parallel \text{Br, MoO}_4$ ($\Delta_r H_{298}^\circ = -30.26$ кДж) показывает, что все системы имеют сингулярный характер. Максимальное поле кристаллизации соответствует наиболее тугоплавкому компоненту — BaMoO_4 .

Отличие систем $\text{Na, Ba} \parallel \text{F(Cl), MoO}_4$ от системы $\text{Na, Ba} \parallel \text{Br, MoO}_4$ в том, что в системах $\text{Na, Ba} \parallel \text{F(Cl), MoO}_4$ помимо реакций обмена протекают и реакции образования двойных соединений:



В каждой из систем $\text{Na, Ba} \parallel \text{F(Cl), MoO}_4$, в отличие от системы $\text{Na, Ba} \parallel \text{Br, MoO}_4$, выявлены три тройные невариантные точки: две эвтектики и перитектика в системе $\text{Na, Ba} \parallel \text{F, MoO}_4$ и три эвтектики в системе $\text{Na, Ba} \parallel \text{Cl, MoO}_4$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлено разбиение трехкомпонентной взаимной системы $\text{Na, Ba} \parallel \text{Br, MoO}_4$ и экспериментально установлены характеристики невариантных равновесий. На стабильной секущей NaBr-BaMoO_4 выявлена перевальная квазидвойная эвтектическая точка e 721°C . Определены координаты (температура плавления, состав) двух тройных эвтектик: E_1 586°C и E_2 525°C . Максимальное поле кристаллизации на квадрате составов отвечает тугоплавкому молибдату бария.

Сравнение тройных эвтектик систем $\text{Na, Ba} \parallel \text{Hal, MoO}_4$ ($\text{Hal} = \text{F, Cl, Br}$) показало, что

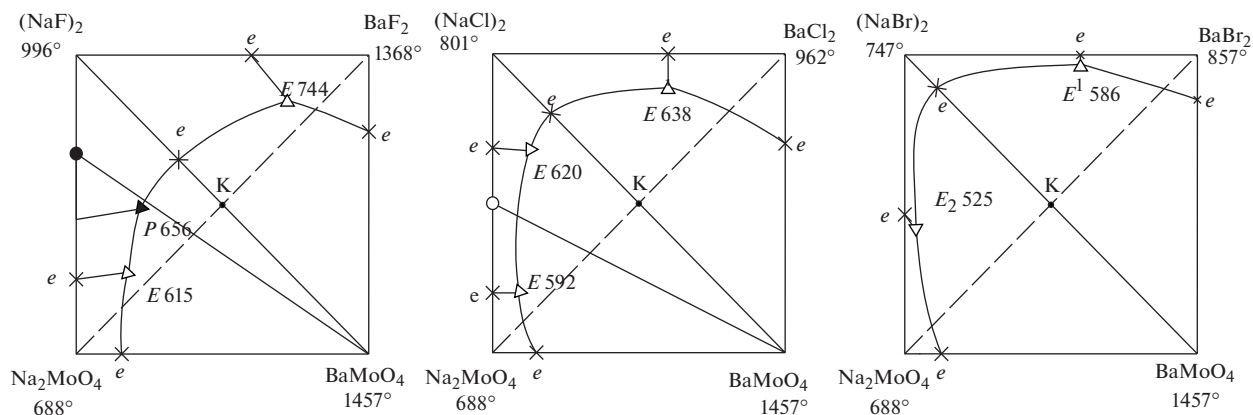


Рис. 8. Ряд трехкомпонентных взаимных систем Na, Ba||F(Cl, Br), MoO₄.

самые низкоплавкие тройные эвтектики выявлены в трехкомпонентной взаимной системе Na, Ba||Br, MoO₄.

Помимо обширного применения солевых композиций низкоплавкие эвтектические составы тройных эвтектик могут быть рекомендованы для электролитического получения молибдена.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Самарского государственного технического университета (проект № 4.5534.2017/8.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ushak S., Fernández A.G., Grageda M. // *Advances in Thermal Energy Storage Systems*. 2015. P. 49.
2. Коровин Н.В., Скундин А.М. и др. *Химические источники тока. Справочник / Отв. ред. Коровин Н.В., Скундин А.М.* М.: Изд-во МЭИ, 2003. 740 с.
3. Dinker Abhay, Agarwal Madhu, Agarwal G.D. // *J. Energy Institute*. 2017. V. 90. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2015.10.002>
4. Kochkarov Zh.A., Zhizhnev R.A. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2014. V. 59. № 4. P. 387. [Кочкаров Ж.А., Жижнев Р.А. // *Журн. неорган. химии*. 2014. Т. 59. № 4. С. 545. <https://doi.org/10.7868/S0044457X14040096> <https://doi.org/10.1134/S0036023614040093>
5. Кочкаров Ж.А., Сокурова З.А., Битокова А.Р. // *Расплавы*. 2017. № 2. С. 127.
6. Kochkarov Zh.A., Khubaeva M.A., Shogenov I.A. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2011. V. 56. № 2. P. 282. [Кочкаров Ж.А., Хубаева М.В., Шогенов И.А. и др. // *Журн. неорган. химии*. 2011. Т. 56. № 2. С. 321.] <https://doi.org/10.1134/S0036023611020124>
7. Garkushin I.K., Ragrina M.S., Sukharenko M.A. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2018. V. 63. № 1. P. 98. [Гаркушин И.К., Рагрин М.С., Сухаренко М.А. // *Журн. неорган. химии*. 2018. Т. 63. № 1. С. 94. <https://doi.org/10.7868/S0044457X18010130> <https://doi.org/10.1134/S0036023618010084>
8. Mancini T. *Advantages of Using Molten Salt*. Sandia National Laboratories. <http://www.webcitation.org/60AE7heEZ>
9. Uhlir J. // *Origin. Res. Article J. Nuclear Maters.* 2007. V. 360. № 1. P. 6. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2006.08.008>
10. Garkushin I.K., Dvoryanova E.M., Gubanova T.V. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2015. V. 60. № 3. P. 324. [Гаркушин И.К., Дворянова Е.М., Губанова Т.В. и др. // *Журн. неорган. химии*. 2015. Т. 60. № 3. С. 374. <https://doi.org/10.7868/S0044457X14120095> <https://doi.org/10.1134/S0036023614120092>
11. Гаркушин И.К., Егорцев Г.Е., Истомова М.А. // *Электрохимическая энергетика*. 2009. Т. 9. № 2. С. 95.
12. Быстров В.П., Ливчак А.В. *Теплоаккумуляторы с использованием фазового перехода // Вопросы экономии теплоэнергетич. ресурсов в системах вентиляции и теплоснабжения. Сб. науч. трудов.* М.: Изд-во ЦНИИЭПИО, 1984.
13. Zhihang Zhao, Mohammad T.Arif, Amanullah M.T.O. // *Energy Procedia*. 2017. V. 110. P. 243. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.134>
14. Rapp Bob // *Mater. Today*. 2015. V. 8. № 12. P. 6. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(05\)71195-0](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(05)71195-0)
15. Гаркушин И.К., Кондратюк И.М., Егорцев Г.Е. и др. *Теоретические и экспериментальные методы исследования многокомпонентных систем.* 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. База данных. *Термические константы веществ. Ин-т теплофизики экстремальных состояний РАН Объединенного ин-та высоких температур РАН. Химический факультет МГУ М.В. Ломоносова* <http://www.chem.msu.ru/cgi-bin/tkv.pl?show=wel-come.html>

19. Данилушкина Е.Г., Кондратюк И.М., Гаркушин И.К. и др. // Междунар. конф. "Физико-химический анализ жидкофазных систем". Тез. докл. Саратов: СГУ, 2003. 159 с.
20. Данилушкина Е.Г., Дворянова Е.М., Кондратюк И.М., Гаркушин И.К. // Матер. Всерос. конф. по термич. анализу. Самара: Самарск. гос. арх.-стр. акад., 2003. С. 51.
21. 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.
22. Verdiev N.N., Babaev B.D., Gasanaliyev A.M. // Russ. J. Inorg. Chem. 1996. V. 41. № 2. P. 296. [Вердиев Н.Н., Бабаев Б.Д., Гасакалиев А.М. // Журн. неорган. химии. 1996. Т. 41. № 2. С. 309.]
23. Космынин А.С. Проекционно-термографический метод исследования гетерогенных равновесий в конденсированных системах. Автореф. дис. ...канд. хим. наук. Куйбышев, 1977. 20 с.
24. Уэндландт У. Термические методы анализа. М.: Мир, 1978. 526 с.
25. Егунов В.П. Введение в термический анализ. Самара: СамВен, 1996. 270 с.
26. Бергман А.Г., Бухалова Г.А. // Изв. сектора физ.-хим. анализа. 1952. Т. 21. С. 228.
27. Лупейко Т.Г., Тарасов Н.И., Зяблин В.Н. и др. // Новые возможности расчетов термодинамических характеристик солевых систем на основе их диаграмм плавкости. М., 2012. С. 90.
28. Васина Н.А., Грызлова Е.С., Шапошникова С.Г. Теплофизические свойства многокомпонентных солевых систем. М.: Химия, 1984. 112 с.
29. Космынин А.С., Трунин А.С. // Тр. Самар. научн. школы по физ.-хим. анализу многокомпонентных систем. 2006. 183 с.
30. Трунин А.С. Комплексная методология исследования многокомпонентных систем. Самара: СамГТУ, 1997. 307 с. ISBN 5-230-558-3