ЖУРНАЛ НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ, 2023, том 68, № 4, с. 509–516

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 541.123.7+543.572.3

ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ $NaCl–NaVO_3–Na_2ЭO_4$ (Э = Mo, W)

© 2023 г. Т. В. Губанова[a], *, Н. С. Кравец[a], И. К. Гаркушин[a]

[a] *Самарский государственный технический университет, ул. Молодогвардейская, 244, Самара, 443100 Россия*

**e-mail: lecome@yandex.ru*

Поступила в редакцию 07.11.2022 г.
После доработки 12.01.2023 г.
Принята к публикации 13.01.2023 г.

Исследованы фазовые равновесные состояния в двухкомпонентной системе $NaVO_3–Na_2WO_4$ и трехкомпонентных системах $NaCl–NaVO_3–Na_2ЭO_4$ (Э = Mo, W). Проведен анализ фазового комплекса трехкомпонентных систем $NaCl–NaVO_3–Na_2ЭO_4$ (Э = Mo, W). Методом дифференциального термического анализа установлено, что двойная система эвтектическая, а трехкомпонентные системы разбиваются соединением $Na_3ClЭO_4$ на два вторичных треугольника, в каждом из которых выявлены эвтектики. Установлено содержание компонентов в тройных эвтектиках и их температуры плавления. Для всех элементов фазовых диаграмм, исследованных в работе, описаны фазовые равновесия. Поле кристаллизации Na_2WO_4 представлено α-, β- и γ-фазами, поле кристаллизации Na_2MoO_4 – δ-, γ- и β-фазами. Минимальное поле кристаллизации в тройных системах принадлежит низкоплавкому $NaVO_3$.

Ключевые слова: дифференциальный термический анализ, трехкомпонентные системы, эвтектика, фазовые равновесия, соли натрия

DOI: 10.31857/S0044457X22601924, **EDN:** FLXRXT

ВВЕДЕНИЕ

Ионные расплавы востребованы в различных технологиях для создания многофункциональных материалов: электролитов химических источников тока, рабочих тел тепловых аккумуляторов, сред для проведения химических реакций и т.д. Наличие у них широкого температурного диапазона в жидком состоянии позволяет использовать их в технологических, химических и электрохимических процессах, невозможных для других растворителей [1–18].

В ряду систем $NaCl–NaVO_3–Na_2ЭO_4$ (Э = Cr, Mo, W) не исследованы системы $NaCl–NaVO_3–Na_2MoO_4$ и $NaCl–NaVO_3–Na_2WO_4$, которые изучены в настоящей работе.

Системы $NaCl–NaVO_3–Na_2WO_4$ и $NaCl–NaVO_3–Na_2MoO_4$ включают четыре исходных вещества. Температуры плавления NaCl и $NaVO_3$ равны 801 и 630°C соответственно [19].

Молибдат натрия имеет четыре полиморфные модификации [19]: α-Na_2MoO_4 до температуры 451°C, β-Na_2MoO_4 в интервале температур от 451 до 585°C, γ-Na_2MoO_4 в интервале температур от 585 до 635°C и δ-Na_2MoO_4 до температуры плавления 688°C. Вольфрамат натрия имеет три полиморфные модификации [19]: α-Na_2WO_4 до температуры 576°C, β-Na_2WO_4 в интервале температур от 576 до 589°C и γ-Na_2WO_4 до температуры плавления 696°C. Отклонения по температурам плавления и полиморфным переходам веществ составляют ±1–1.5°C.

Исходные вещества ($NaVO_3$, Na_2MoO_4, Na_2WO_4 марки “ч. д. а.” и NaCl марки “х. ч.”) были предварительно обезвожены при температуре 300–350°C в течение 4 ч и помещены в бюксы, которые хранили в эксикаторе с осушителем.

Кривые охлаждения (нагревания) исследуемых образцов снимали на установке дифференциального термического анализа (**ДТА**) с верхним подводом термопар [20, 21]. Регистрацию температуры осуществляли Pt–Pt/Rh-комбинированной термопарой. Холодные спаи термостатировали при 0°C в сосуде Дьюара с тающим льдом. Сигнал поступал на АЦП и преобразовывался в цифровой сигнал в интерфейсе программы DSC Tool 2.0 с выводом на компьютер. Скорость нагрева (охлаждения) смесей, помещенных в платиновые микротигли, составляла 15 град/мин. Индифферентное вещество – свежепрокаленный Al_2O_3 марки “ч. д. а.”. Масса навесок смесей веществ составляла 0.2 г при точности взвешивания ±0.0001 г на аналитических весах Shimadzu AUX

Таблица 1. Характеристики нонвариантных точек в двухкомпонентных системах

Система	Тип превращения	Состав, мол. %				$t_{плавл}$, °C
		NaCl	$NaVO_3$	Na_2MoO_4	Na_2WO_4	
$NaCl–NaVO_3$ [22]	Эвтектика	24.0	76.0	–	–	598
$NaCl–Na_2WO_4$ [23]	Эвтектика	54.0	–	–	46.0	657
	Дистектика	50.0	–	–	50.0	680
	Эвтектика	20.0	–	–	80.0	628
$NaCl–Na_2MoO_4$ [23, 24]	Эвтектика	58.0	–	42.0	–	628
	Дистектика	50.0	–	50.0	–	644
	Эвтектика	22.0	–	78.0	–	606

220. Составы смесей выражены в мол. %, температуры – в °C.

Данные по двухкомпонентным системам приведены в табл. 1.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Обзор литературы показывает, что из всех двухкомпонентных систем необходимо изучить систему $NaVO_3–Na_2WO_4$. Анализ систем $NaVO_3–Na_2ЭO_4$ (Э = Cr, Mo) [22–24] показал, что они относятся к эвтектическому типу. Поэтому и в системе $NaVO_3–Na_2WO_4$ следует ожидать образования эвтектики.

Трехкомпонентные системы $NaCl–NaVO_3–Na_2ЭO_4$ (Э = Mo, W). Анализ фазового комплекса системы $NaCl–NaVO_3–Na_2CrO_4$ показал, что система эвтектическая [25]. Отличием систем $NaCl–NaVO_3–Na_2ЭO_4$ (Э = Mo, W) от системы с хроматом натрия является наличие соединения $Na_3ClЭO_4$ (*D*) конгруэнтного плавления, которое в тройных системах $NaCl–NaVO_3–Na_2ЭO_4$ разбивает треугольник состава на два симплекса: $NaCl–NaVO_3–Na_3ClЭO_4$ и $Na_2ЭO_4–NaVO_3–Na_3ClЭO_4$ (рис. 1а). Данному варианту разбиения соответствует несколько вариантов моделей ликвидуса (рис. 1а–1в), а в случае выклинивания соединения $Na_3ClЭO_4$ возможны варианты без разбиения на симплексы (рис. 1г, 1д).

Если соединение *D* не изменяет конгруэнтный характер плавления, то реализуется вариант, приведенный на рис. 1а. Стабильная секущая $NaVO_3–D$ должна иметь квазибинарный характер с образованием перевальной точки e_5, а в каждом фазовом треугольнике должны образовываться эвтектики E_1 и E_2. При смене характера плавления конгруэнтного соединения *D* внутри тройной системы на инконгруэнтный варианты ликвидусов изображены на рис. 1б–1д. В них секущая $NaVO_3–D$ не имеет характера квазибинарной системы, поэтому вместо двух эвтектик должны образовываться эвтектика и перитектика: E_1 и P_1 (рис. 1б), E_2 и P_2 (рис. 1в) или эвтектика и точка выклинивания *R* (рис. 1г, 1д).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Двойная система $NaVO_3–Na_2WO_4$ исследована в настоящей работе. На основании совокупности данных ДТА девяти составов построена *T–x*-диаграмма (рис. 2). Экспериментально установлен состав эвтектики: 70.0 мол. % $NaVO_3$ и 30.0 мол. % Na_2WO_4 с температурой плавления 552°C. На кривой кристаллизации Na_2WO_4 фиксируются полиморфные переходы $\alpha \leftrightarrows \beta$-$Na_2WO_4$ и $\beta \leftrightarrows \gamma$-$Na_2WO_4$ с температурами 576 и 585°C соответственно (рис. 2). Эвтектике e_1 соответствует фазовое равновесие $ж \leftrightarrows NaVO_3 + \alpha$-$Na_2WO_4$.

Для подтверждения разбиения тройных систем на симплексы (рис. 3, 4) в предположении реализации варианта ликвидуса (рис. 1а) методом ДТА исследованы стабильные секущие $NaVO_3–Na_3ClЭO_4$, на которых определены координаты квазидвойных эвтектик: e_5 – 589°C, 68.0% $NaVO_3$ + + 32.0% Na_3ClWO_4; e_9 – 575°C, 61.0% $NaVO_3$ + + 39.0% Na_3ClMoO_4.

Планирование эксперимента и исследование систем проводили проекционно-термографическим методом. В системе $NaCl–NaVO_3–Na_2WO_4$ с помощью ДТА исследован политермический разрез *AB*, расположенный в поле кристаллизации $NaVO_3$ как самого низкоплавкого компонента, в системе $NaCl–NaVO_3–Na_2MoO_4$ – политермический разрез *KL*, пересекающий поля кристаллизации Na_2MoO_4, D_2, NaCl.

Из *T–x*-диаграммы разреза *AB* (*A* – 80 мол. % $NaVO_3$ + 20 мол. % NaCl, *B* – 80 мол. % $NaVO_3$ + + 20 мол. % Na_2WO_4, рис. 5) определены температуры плавления тройных эвтектик E_1 и E_2 (560 и 540°C соответственно), а также соотношение компонентов NaCl : Na_2WO_4 в них. В результате исследования политермических разрезов $NaVO_3–\bar{E}_1–E_1$ (рис. 6) и $NaVO_3–\bar{E}_2–E_2$ (рис. 7) определе-

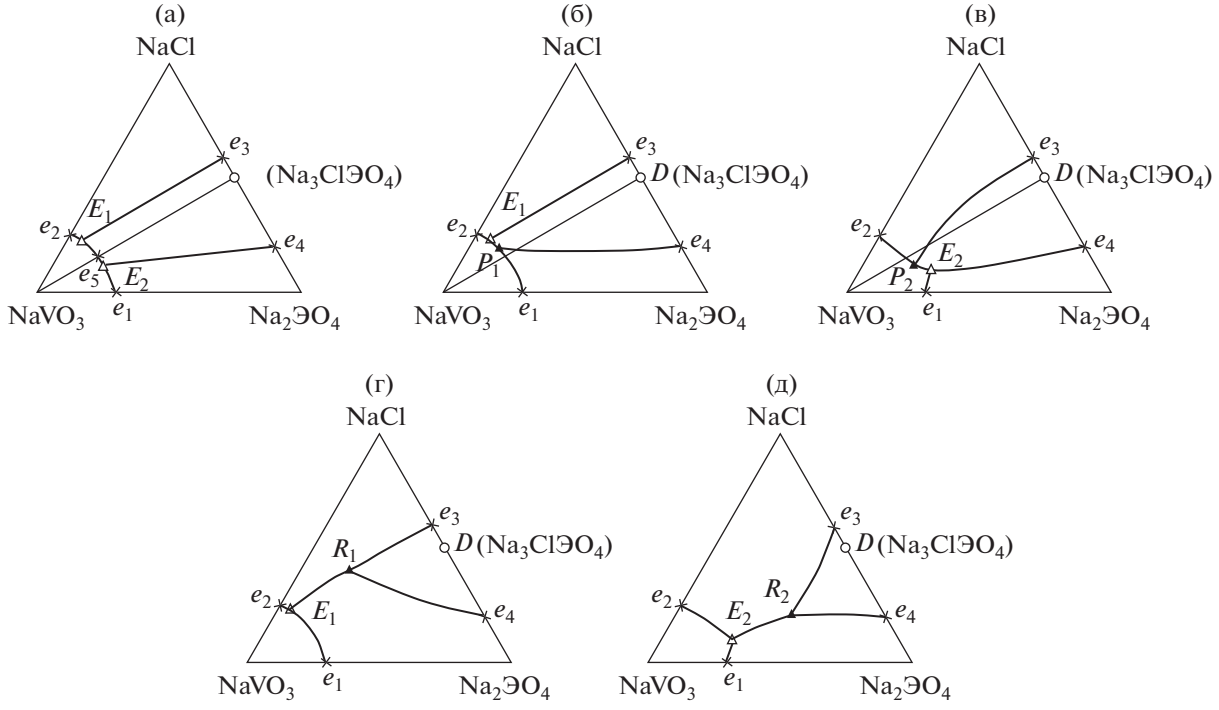

Рис. 1. Модели ликвидусов систем $NaCl–NaVO_3–Na_2ЭO_4$: а – система с соединением конгруэнтного плавления; б, в – системы с переходом конгруэнтного процесса плавления в инконгруэнтный; г, д – системы с точками выклинивания.

ны составы тройных эвтектик: E_1 – 23.4 мол. % NaCl + 71.5 мол. % $NaVO_3$ + 5.1 мол. % Na_2WO_4; E_2 – 14.4 мол. % NaCl + 68.0 мол. % $NaVO_3$ + + 17.6 мол. % Na_2WO_4.

На $T–x$-диаграмме разреза KL (K – 50 мол. % $NaVO_3$ + 50 мол. % NaCl, L – 50 мол. % $NaVO_3$ + + 50 мол. % Na_2MoO_4, рис. 8) каждая эвтектика отражается двумя проекциями из двух полюсов кристаллизации: E_3 568°C – из полюсов NaCl и D_2; E_4 530°C – из полюсов D_2 и Na_2MoO_4. $T–x$-диаграмма разреза позволила определить температуры плавления тройных эвтектик и однозначно найти координаты составов эвтектик в концентрационном треугольнике: E_3 568°C при содержании 24.0 мол. % NaCl, 66.0 мол. % $NaVO_3$ и 10.0 мол. % Na_2MoO_4 (пересечение продолжения лучей $NaCl–\overline{E}_3$ и $D_2–\overline{E}_3$); E_4 530°C при содержании 9.5 мол. % NaCl, 56.0 мол. % $NaVO_3$ и 34.5 мол. % Na_2MoO_4 (пересечение продолжения лучей $Na_2MoO_4–\overline{E}_4$ и $D_2–\overline{E}_4$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В двухкомпонентной системе $NaVO_3–Na_2WO_4$ температура плавления Na_2WO_4 (696°C) выше температуры плавления $NaVO_3$ (630°C), поэтому эвтектика приближена к низкоплавкому компоненту. Диаграмма представлена одним однофазным полем (ж) выше ликвидуса и четырьмя двухфазными полями: ж + $NaVO_3$, ж + γ-Na_2WO_4, ж + + β-Na_2WO_4, ж + α-Na_2WO_4. Ветви кристаллизации α-, β- и γ-Na_2WO_4 преобладают над кривой кристаллизации $NaVO_3$. Для кривых моновариантных равновесий отмечены следующие фазовые реакции (рис. 2): ж ⇆ $NaVO_3$ (ae_1), ж ⇆ γ-Na_2WO_4 (e_1p_2), ж ⇆ β-Na_2WO_4 (p_1p_2), ж ⇆ α-Na_2WO_4 ($p_1в$).

Разбиение системы, подтвержденное данными ДТА, показало стабильный характер квазибинарных сечений $NaVO_3–Na_3ClWO_4$ и $NaVO_3–Na_3ClMoO_4$ с наличием перевальных точек e_5 и e_9: температура плавления смеси, отвечающей эвтектике e_5, на 14°C выше температуры плавления квазибинарной эвтектики e_9. При этом e_9 содержит в смеси больше соединения D_2, чем в смеси состава e_5 содержится D_1 ($t_{плавл}(D_2) < t_{плавл}(D_1)$). В результате эксперимента показано, что реализуется вариант ликвидуса, показанный на рис. 1а.

Поле кристаллизации Na_2WO_4 (рис. 3) представлено фазами α–Na_2WO_4, β-Na_2WO_4 и γ-Na_2WO_4, поле кристаллизации Na_2MoO_4 (рис. 4) – фазами δ-Na_2MoO_4, γ-Na_2MoO_4 и β-Na_2MoO_4.

Самая низкоплавкая эвтектика E_4 530°C расположена в симплексе $NaVO_3–Na_3ClMoO_4–Na_2MoO_4$, а самая тугоплавкая E_3 568°C – в симплексе $NaVO_3–Na_3ClMoO_4–NaCl$. В проекциях

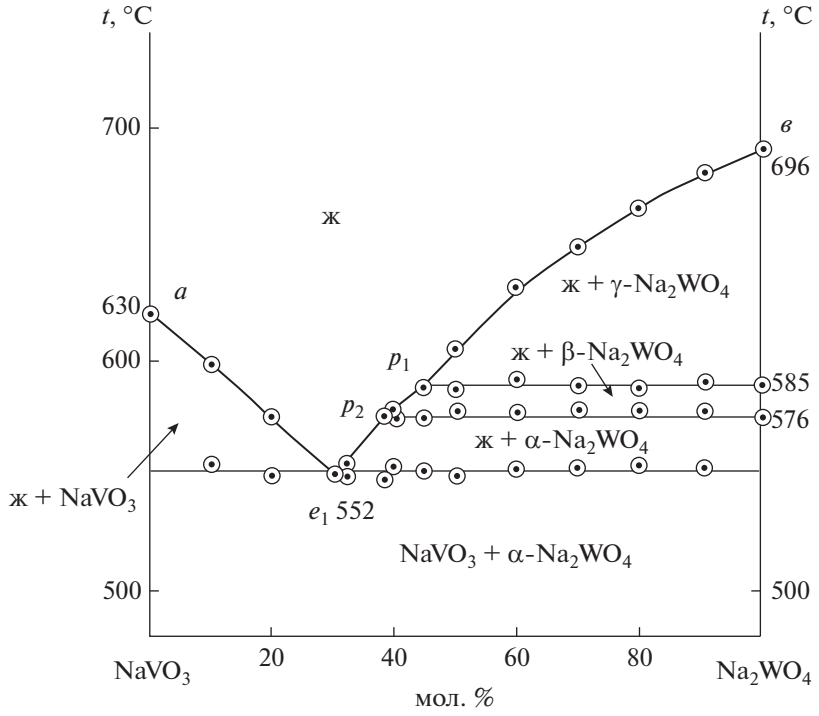

Рис. 2. *T*–*x*-диаграмма двойной системы $NaVO_3$–Na_2WO_4.

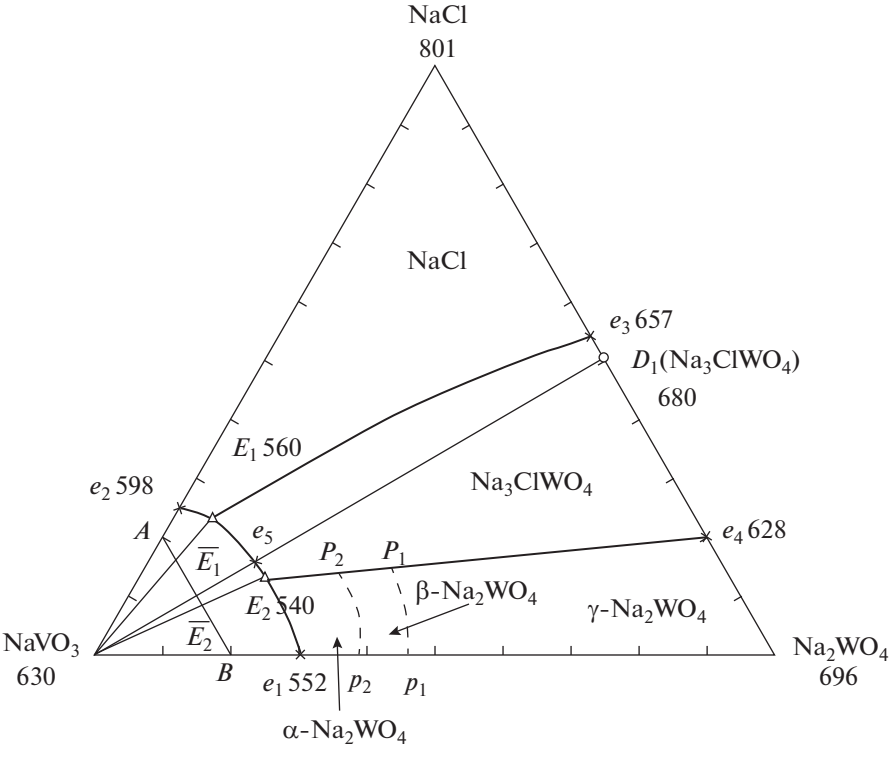

Рис. 3. Проекция поверхности ликвидуса на треугольник составов системы NaCl–$NaVO_3$–Na_2WO_4.

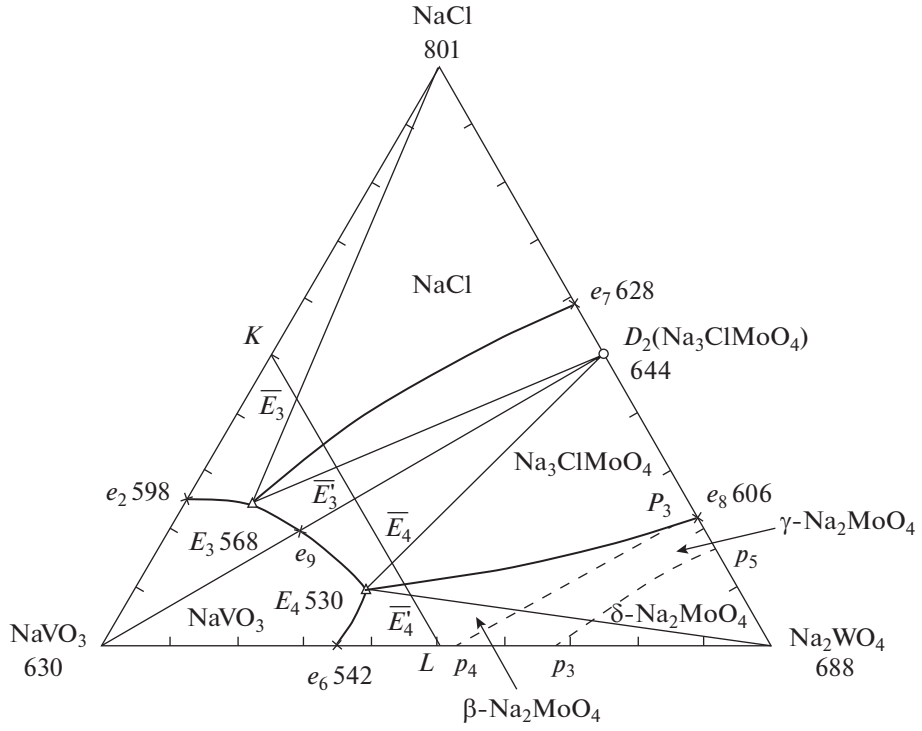

Рис. 4. Проекция поверхности ликвидуса на треугольник составов системы $NaCl–NaVO_3–Na_2MoO_4$.

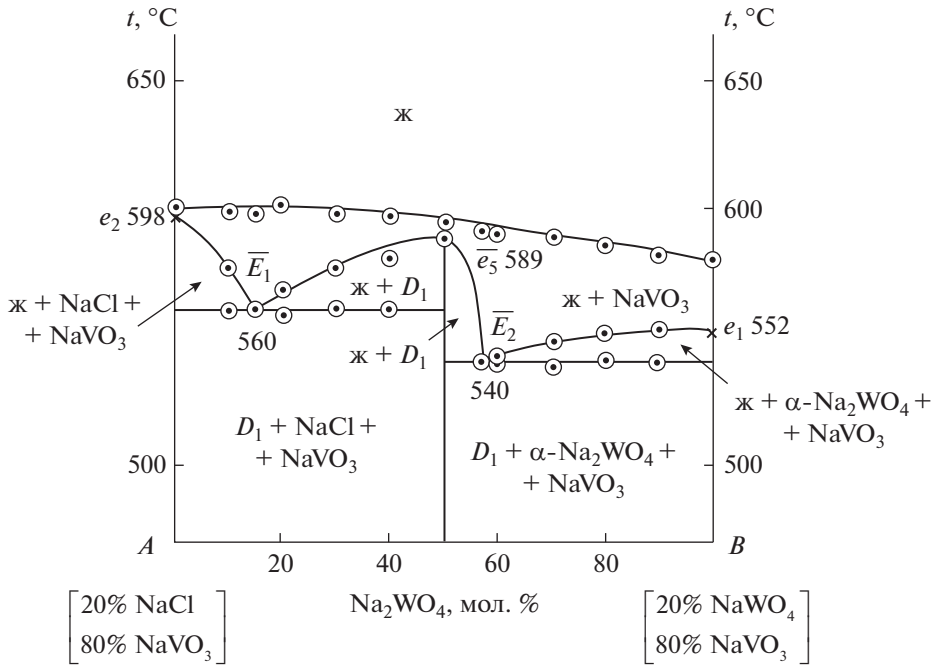

Рис. 5. *T–x*-диаграмма разреза *AB* трехкомпонентной системы $NaCl–NaVO_3–Na_2WO_4$.

на треугольник составов систем $NaCl–NaVO_3–Na_2ЭO_4$ (рис. 3, 4) минимальное поле кристаллизации принадлежит $NaVO_3$ при сравнительно эквивалентных площадях NaCl, $Na_2ЭO_4$ и $Na_3ClЭO_4$. На термограммах эвтектических составов e_1, E_1, E_2 и E_3 фиксируется по одному симметричному термоэффекту, а для E_4 – два термоэффекта, из которых при 530°C в эвтектике существуют твер-

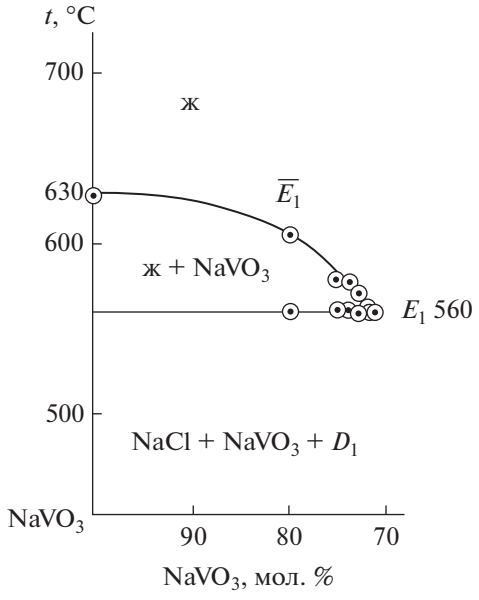

Рис. 6. *T*–*x*-диаграмма нонвариантного разреза $NaVO_3$–$\overline{E}_1$–E_1.

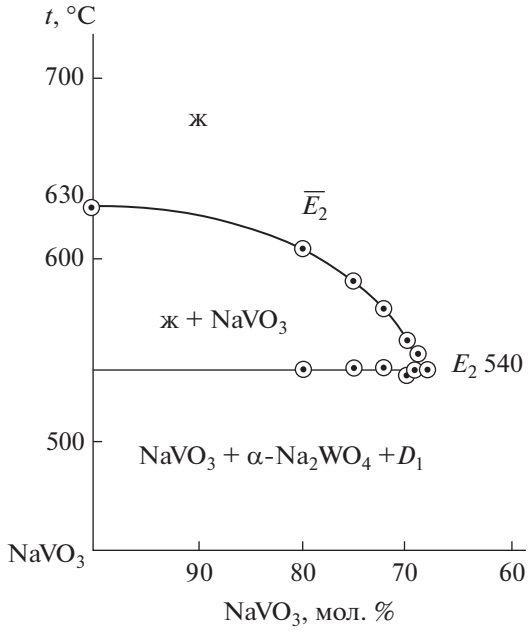

Рис. 7. *T*–*x*-диаграмма нонвариантного разреза $NaVO_3$–$\overline{E}_2$–E_2.

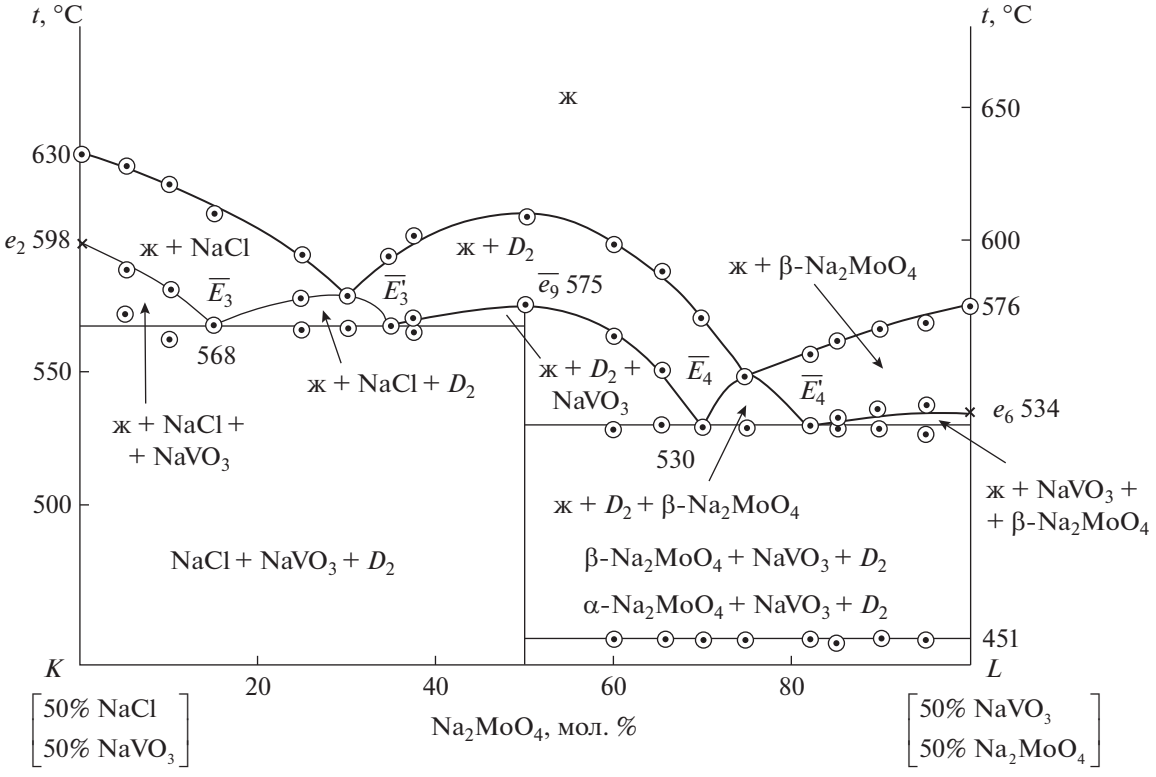

Рис. 8. *T*–*x*-диаграмма разреза *KL* трехкомпонентной системы $NaCl$–$NaVO_3$–Na_2MoO_4.

дые фазы Na_3ClMoO_4, $NaVO_3$ и β-Na_2MoO_4, а ниже температуры 451°C – фазы Na_3ClMoO_4, $NaVO_3$ и α-Na_2MoO_4.

При сравнительно близком числе экспериментальных составов, необходимых для поиска эвтектик E_1 и E_2, E_3 и E_4, более рациональным явля-

Таблица 2. Ди-, моно- и нонвариантные равновесные состояния в системах $NaCl–NaVO_3–Na_2ЭO_4$ (Э = Mo, W)

Элемент диаграммы	Равновесное состояние	Фазовая реакция
	Система $NaCl–NaVO_3_Na_2WO_4$	
$NaVO_3e_1E_2e_5E_1e_2NaVO_3$	Дивариантное	ж ⇄ $NaVO_3$
$NaCle_2E_1e_3NaCl$	Дивариантное	ж ⇄ NaCl
$D_1e_3E_1e_5E_2P_2P_1e_4D_1$	Дивариантное	ж ⇄ D_1
$Na_2WO_4p_1P_1e_4Na_2WO_4$	Дивариантное	ж ⇄ α-Na_2WO_4
$p_1p_2P_2P_1p_1$	Дивариантное	ж ⇄ β-Na_2WO_4
$p_2e_1E_2P_2p_2$	Дивариантное	ж ⇄ γ-Na_2WO_4
e_1E_2	Моновариантное	ж ⇄ $NaVO_3$ + α-Na_2WO_4
e_2E_1	Моновариантное	ж ⇄ NaCl + $NaVO_3$
$E_1e_5E_2$	Моновариантное	ж ⇄ $NaVO_3$ + D_1
e_3E_1	Моновариантное	ж ⇄ NaCl + D_1
e_4P_1	Моновариантное	ж ⇄ γ-Na_2WO_4 + D_1
P_1P_2	Моновариантное	ж ⇄ β-Na_2WO_4 + D_1
P_2E_2	Моновариантное	ж ⇄ α-Na_2WO_4 + D_1
E_1	Нонвариантное	ж ⇄ NaCl + $NaVO_3$ + D_1
E_2	Нонвариантное	ж ⇄ $NaVO_3$ + D_1 + α-Na_2WO_4
	Система $NaCl–NaVO_3–Na_2MoO_4$	
$NaVO_3e_2E_3e_9E_4e_6NaVO_3$	Дивариантное	ж ⇄ $NaVO_3$
$NaCle_2E_3e_7NaCl$	Дивариантное	ж ⇄ NaCl
$D_2e_7E_3e_9E_4P_3e_8D_2$	Дивариантное	ж ⇄ D_2
$Na_2MoO_4p_3p_5Na_2MoO_4$	Дивариантное	ж ⇄ δ-Na_2MoO_4
$p_3p_4P_3e_8p_5p_3$	Дивариантное	ж ⇄ γ-Na_2MoO_4
$p_4e_6E_4P_3p_4$	Дивариантное	ж ⇄ β-Na_2MoO_4
e_2E_3	Моновариантное	ж ⇄ $NaVO_3$ + NaCl
e_7E_3	Моновариантное	ж ⇄ NaCl + D_2
$E_3e_9E_4$	Моновариантное	ж ⇄ $NaVO_3$ + D_2
e_6E_4	Моновариантное	ж ⇄ $NaVO_3$ + β-Na_2MoO_4
e_8P_3	Моновариантное	ж ⇄ D_2 + γ-Na_2MoO_4
P_3E_4	Моновариантное	ж ⇄ D_2 + β-Na_2MoO_4
E_3	Нонвариантное	ж ⇄ NaCl + $NaVO_3$ + D_2
E_4	Нонвариантное	ж ⇄ $NaVO_3$ + D_2 + β-Na_2MoO_4

ется политермический разрез *KL* в системе $NaCl–NaVO_3–Na_2MoO_4$, по результатам ДТА которого однозначно определяются температуры плавления эвтектик E_3 (E_4) пересечением двух коннод с последующей проверкой составов, отвечающих точкам пересечений (составам эвтектик).

В табл. 2 приведены фазовые равновесия для полей, линий и точек в тройных системах $NaCl–NaVO_3–Na_2ЭO_4$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен анализ морфологии ликвидуса в трехкомпонентных системах $NaCl–NaVO_3–Na_2ЭO_4$ (Э = Mo, W). Экспериментально доказано, что стабильные секущие $NaVO_3–D_1(Na_3ClWO_4)$ и $NaVO_3–D_2(Na_3ClMoO_4)$ имеют квазибинарный характер. В системах реализуется вариант, в котором ликвидус имеет нонвариантное равновесие в двух стабильных элементах – вторичных фазовых

треугольниках $NaCl–NaVO_3–Na_3ClЭO_4$ и $NaVO_3–Na_3ClЭO_4–Na_2ЭO_4$. Поверхность кристаллизации трехкомпонентных систем $NaCl–NaVO_3–Na_2WO_4$ и $NaCl–NaVO_3–Na_2MoO_4$ представлена четырьмя полями кристаллизации исходных солей и соединений $Na_3ClЭO_4$, сходящихся в двух эвтектических точках E_1, E_2 и E_3, E_4 соответственно. В полях кристаллизации вольфрамата и молибдата натрия отмечены полиморфные превращения.

Минимальную температуру плавления имеет эвтектика в симплексе $NaVO_3–Na_3ClMoO_4–Na_2MoO_4$ трехкомпонентной системы $NaCl–NaVO_3–Na_2MoO_4$.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коровин Н.В., Скундин А.М. и др.* Химические источники тока: Справочник / Отв. ред. Коровин Н.В., Скундин А.М. М.: МЭИ, 2003. 740 с.
2. *Rasulov A.I., Akhmedova P.A., Gamataeva B.Yu. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2019. V. 64. № 1. P. 135. https://doi.org/10.1134/S0036023619010169
3. *Делимарский Ю.К., Барчук Л.П.* Прикладная химия ионных расплавов. Киев: Наук. думка, 1988. 192 с.
4. *Venkateswararao Mannava, Sambasiva Rao A., Kamaraj M. et al.* // J. Mater. Eng. Perform. 2019. V. 28. P. 1077. https://doi.org/10.1007/s11665-019-3866-4
5. *Pacheco J., Showalter S.K., Koll W.J.* // J. Sol. Energy Eng. 2002. V. 124. № 2. P. 153. https://doi.org/10.1115/1.1464123
6. *Likhacheva S.S., Egorova E.M., Garkushin I.K.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2020. V. 65. № 7. P. 1047. https://doi.org/10.1134/S0036023620070141
7. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / Под ред. Денисова В.В. Ростов-на-Дону: Феникс, 2015. 382 с.
8. *Garkushin I.K., Burchakov A.V., Sukharenko M.A. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2020. V. 65. № 7. P. 1398. https://doi.org/10.1134/S003602362009003X
9. *Васина Н.А., Ирызлова Е.С., Шапошникова С.Г.* Теплофизические свойства многокомпонентных солевых систем. М.: Химия, 1984. 112 с.
10. *Sang S.H., Guo X.F., Zhang T.T. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. № 3. P. 374. https://doi.org/10.1134/S0036023621030141
11. *Asadov M.M., Akhmedova N.A., Mamedova S.R. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2020. V. 65. № 7. P. 1061. https://doi.org/10.1134/S0036023620070013
12. *Cherkasov D.G., Danilina V.V., Il'in K.K.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. № 6. P. 883. https://doi.org/10.1134/S0036023621060073
13. *Sukharenko M.A., Garkushin I.K., Zubkova A.V.* // Inorg. Mater. 2021. V. 57. № 8. P. 811. https://doi.org/10.1134/S0020168521080148
14. *Bizhe Su, Shuilin Wu, Hanqin Liang et al.* // Chem. Mater. 2020. V. 32. № 20. P. 8836. https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.0c02244
15. *Petrova M.A., Sinel'shchikova O. Yu.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 6. № 2. P. 209. https://doi.org/10.1134/S0036023622020127
16. *Shestakov V.A., Kosyakov V.I.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. № 3. P. 401. https://doi.org/10.1134/S0036023621030165
17. *Луцык В.И.* Анализ поверхности ликвидуса тройных систем. М.: Наука, 1987. 150 с.
18. *Посыпайко В.И.* Методы исследования многокомпонентных систем. М.: Наука, 1978. 255 с.
19. Термические константы веществ / Под ред. Глушко В.П. Вып. X. Ч. 1. М.: ВИНИТИ, 1981. 297 с.
20. *Уэндландт У.* Термические методы анализа. Пер. с англ. под ред. Степанова В.А., Берштейна В.А. М.: Мир, 1978. 526 с.
21. *Wagner M.* Thermal Analysis in Practice: Fundamental Aspects. Hanser Publications, 2018. 349 p.
22. Справочник по плавкости систем из безводных неорганических солей / Под ред. Воскресенской Н.К. М.: АН СССР, 1961. Т. 1. 845 с.
23. *Посыпайко В.И., Алексеева Е.А., Васина Н.А.* Диаграммы плавкости солевых систем. Ч. III / Под ред. Посыпайко В.И. М.: Металлургия, 1977. 204 с.
24. *Трунин А.С., Бухалова Г.А., Петрова Д.Г. и др.* // Журн. неорган. химии. 1976. Т. 21. № 9. С. 2506.
25. *Gubanova T.V., Afanas'eva A.D., Buzgon E.A. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2018. V. 63. № 2. P. 270. https://doi.org/10.1134/S0036023618020067