

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 541.123.3+549.76

ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ В СТАБИЛЬНОМ ТРЕУГОЛЬНИКЕ
NaF–Na₃SiMoO₄–Na₃SiWO₄ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНОЙ
СИСТЕМЫ NaF–NaCl–Na₂MoO₄–Na₂WO₄

© 2023 г. И. К. Гаркушин^а, А. А. Матвеев^а, М. А. Сухаренко^а, *

^аСамарский государственный технический университет,
ул. Молодогвардейская, 244, Самара, 443100 Россия

*e-mail: sukhareno_maria@mail.ru

Поступила в редакцию 17.03.2023 г.

После доработки 25.08.2023 г.

Принята к публикации 28.08.2023 г.

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование стабильного секущего треугольника NaF–Na₃SiMoO₄–Na₃SiWO₄ четырехкомпонентной системы NaF–NaCl–Na₂MoO₄–Na₂WO₄. На основании проведенного обзора литературы по элементам ограничения системы установлено, что в исследуемом стабильном треугольнике возможны два варианта прогноза числа и состава кристаллизующихся фаз: в случае устойчивости твердых растворов образуются две твердые фазы, в случае распада – три твердые фазы. Экспериментальное исследование системы NaF–Na₃SiMoO₄–Na₃SiWO₄ проведено методами дифференциального термического и рентгенофазового анализа. Выявлены температура плавления и состав смеси, отвечающей точке *d*, которая лежит на монотонной кривой *e*₁*e*₂, соединяющей двойные эвтектики. Рентгенофазовый анализ образца сплава состава точки *d*, показал наличие двух твердых фаз – NaF и непрерывный ряд твердых растворов (НРТР) Na₃SiMo_{*x*}W_{1–*x*}O₄. Установлено отсутствие в исследуемой системе точек неинвариантных равновесий. Непрерывный ряд твердых растворов на основе соединений Na₃SiMoO₄ и Na₃SiWO₄ является устойчивым. Проекция фазового комплекса системы на треугольник составов представлена двумя полями кристаллизации исходных веществ: фторида натрия, поле которого является доминирующим, и НРТР Na₃SiMo_{*x*}W_{1–*x*}O₄.

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

DOI: 10.31857/S0044457X23700253, EDN: ZKERDX

ВВЕДЕНИЕ

Расплавляемые композиции на основе галогенидов, молибдатов и вольфраматов щелочных металлов находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Они используются для получения оксидных бронз, применяются для получения гальванических покрытий и синтеза молибдатов и вольфраматов *d*-элементов. Например, в работах [1, 2] показана возможность химического синтеза оксидных вольфрамовых бронз свинца и щелочных металлов в ионных расплавах многокомпонентных систем. В работе [3] предложен способ получения оксидных вольфрамовых бронз с помощью электроосаждения из поливольфраматных расплавов на никелевой подложке. В работе [4] показана возможность получения тонких вольфрамовых гальванических покрытий из расплавов вольфраматов щелочных металлов. Разработка рационального способа получения молибдата кобальта в высокодисперсном

состоянии при относительно низкой температуре показана в работе [5].

Прогресс в области получения и исследования новых материалов невозможен без детального изучения фазовых диаграмм многокомпонентных систем [6–15]. Исследование фазовых равновесий в солевых, оксидных, органических системах сегодня является актуальной задачей [16–21]. Тем не менее многие фазовые диаграммы остаются недостаточно изученными.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Разбиение на симплексы четырехкомпонентной системы NaF–NaCl–Na₂MoO₄–Na₂WO₄ проводили геометрическим методом. Остов и развертка составов исследуемой системы приведены на рис. 1. На двойных сторонах NaCl–Na₂MoO₄ и NaCl–Na₂WO₄ имеются соединения конгруэнтного типа плавления – Na₃SiMoO₄ (D₁) и Na₃SiWO₄ (D₂) соответственно. На сторонах NaF–Na₂MoO₄ и

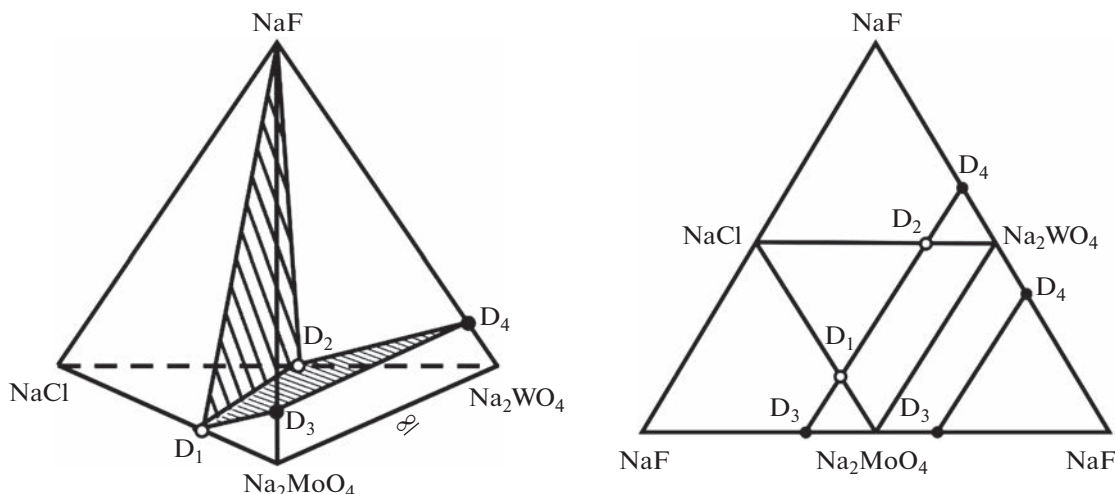


Рис. 1. Остов и развертка составов четырехкомпонентной системы NaF–NaCl–Na₂MoO₄–Na₂WO₄.

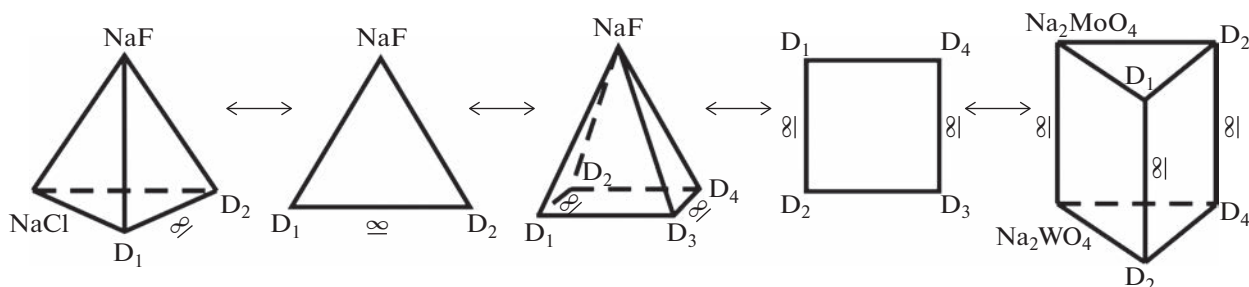


Рис. 2. Древо фаз четырехкомпонентной системы NaF–NaCl–Na₂MoO₄–Na₂WO₄.

NaF–Na₂WO₄ существуют соединения инконгруэнтного типа плавления – Na₃FMoO₄ (D₃) и Na₃FWO₄ (D₄) соответственно. Все четыре соединения участвуют в разбиении системы на симплексы. Древо фаз представлено на рис. 2. Оно имеет линейное строение и состоит из стабильного тетраэдра NaF–NaCl–Na₃ClMoO₄–Na₃ClWO₄, пентагопа NaF–Na₃ClMoO₄–Na₃ClWO₄–Na₃FMoO₄–Na₃FWO₄ и гексагопа Na₂MoO₄–Na₂WO₄–Na₃ClMoO₄–Na₃ClWO₄–Na₃FMoO₄–Na₃FWO₄, разделенных секущими треугольником NaF–Na₃ClMoO₄–Na₃ClWO₄ и квадратом Na₃ClMoO₄–Na₃ClWO₄–Na₃FMoO₄–Na₃FWO₄.

Объектом исследования в настоящей работе является стабильный секущий треугольник NaF–Na₃ClMoO₄–Na₃ClWO₄ четырехкомпонентной системы NaF–NaCl–Na₂MoO₄–Na₂WO₄. Треугольник NaF–Na₃ClMoO₄–Na₃ClWO₄ образован тремя индивидуальными веществами, два из которых являются соединениями конгруэнтного типа плавления. Данные соединения были синтезированы из хлорида и молибдата натрия, а также хлорида и вольфрамата натрия. Термические и термо-

динамические свойства индивидуальных веществ приведены в табл. 1 [22]. Элементами ограничения стабильного треугольника NaF–Na₃ClMoO₄–Na₃ClWO₄ являются три двухкомпонентные системы: NaF–Na₃ClMoO₄, NaF–Na₃ClWO₄, Na₃ClMoO₄–Na₃ClWO₄ [23, 24]. Из них первые две относятся к эвтектическим, а в системе Na₃ClMoO₄–Na₃ClWO₄ образуется непрерывный ряд твердых растворов Na₃ClMo_xW_{1-x}O₄ на основе соединений Na₃ClMoO₄ и Na₃ClWO₄. Таким образом, в тройной системе возможны два варианта прогноза числа и состава кристаллизующихся фаз:

1) В случае устойчивости НРТР в трехкомпонентной системе будут кристаллизоваться две твердые фазы: NaF + Na₃ClMo_xW_{1-x}O₄.

2) В случае распада НРТР в системе будут три кристаллизующиеся фазы: NaF, ограниченный ряд твердых растворов (ОТР) на основе соединения Na₃ClMoO₄ и ОТР на основе Na₃ClWO₄.

Приведем данные, имеющиеся в литературе, по элементам ограничения стабильного треугольника NaF–Na₃ClMoO₄–Na₃ClWO₄ [23, 24].

Таблица 1. Термические и термодинамические свойства индивидуальных веществ

Вещество	M , г/моль	$T_{пл}$, °С	Полиморфный переход, °С	$-\Delta_f H_{298}^\circ$, кДж/моль	$-\Delta_f G_{298}^\circ$, кДж/моль	Ссылка
NaF	41.9882	996	—	$572,831 \pm 1.255$	542.572	[22]
NaCl	58.4428	801	—	384.384 ± 0.251	384.384 ± 2.259	[22]
Na ₂ MoO ₄	205.9172	688	635	1469.002 ± 0.418	1355.147	[22]
Na ₂ WO ₄	293.8272	696	589	1547.661	1433.099	[22]

Квазидвойная система NaF–Na₃ClMoO₄. В системе образуется двойная эвтетика с температурой плавления 598°С и составом 17.5 экв. % NaF + 82.5 экв. % Na₃ClMoO₄. Твердые фазы – NaF, Na₃ClMoO₄.

Квазидвойная система NaF–Na₃ClWO₄. В системе происходит образование эвтектики с температурой плавления 637°С и составом 79 экв. % NaF + 21 экв. % Na₃ClWO₄. Твердые фазы – NaF, Na₃ClWO₄ [23].

Двойная система Na₃ClMoO₄–Na₃ClWO₄. Точки неинвариантных равновесий отсутствуют, образуется НРТР на основе соединений Na₃ClMo_xW_{1-x}O₄ [24].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследование фазовых равновесий в стабильном треугольнике NaF–Na₃ClMoO₄–Na₃ClWO₄ и элементах его ограничения проводили с помощью дифференциального термического анализа (ДТА) на установке с верхним подводом термопар [25]. Установка включает печь шахтного типа, в которую опускаются платиновые микротигли (изделия № 108-2, 108-3 по ГОСТ 13498-68) с исследуемым составом и с индифферентным веществом – свежeproкаленным Al₂O₃ (ч. д. а.). Холодные спаи термостатировали при 0°С с помощью сосуда Дьюара с тающим льдом. Сигнал от термопар поступал на АЦП и преобразовывался в цифровой сигнал с выводом на компьютер. Фиксировали температурную и дифференциальную кривые. Градуировку термопар осуществляли по известным температурам плавления и полиморфных превращений безводных неорганических солей [22]. Исследования проведены до 750°С.

Скорость нагрева (охлаждения) образцов составляла 10–15 град/мин. Точность измерения температур составляла ±2.5°С, при точности взвешивания составов ±0.0001 г на аналитических весах. Составы всех смесей, приведенные в настоящей работе, выражены в молярных концентрациях эквивалентов, температуры – в градусах Цельсия. Масса исходных смесей составляла 0.3 г.

Рентгенофазовый анализ (РФА) осуществляли с помощью метода Дебая–Шерера (метод порошка) [26] на дифрактометре Arl X'tra. Прибор скон-

струирован по принципу вертикальной геометрии Брэгга–Брентано. Съемку дифрактограмм осуществляли при CuK_α-излучении с никелевым β-фильтром. Режим съемки образца: напряжение на трубке 35 кВ, ток рентгеновской трубки 10 мА, скорость съемки –1 град/мин, угловые отметки через $\theta = 1^\circ$. Образцы для РФА отжигали в платиновых тиглях при температуре на 10–20°С ниже температур конечного затвердевания расплавов в течение 2 ч, затем закаляли на льду, перетирали в агатовой ступке и запрессовывали в кюветы. Идентификацию фаз осуществляли по межплоскостным расстояниям d (нм) и относительным интенсивностям I/I_0 (%) рефлексов с использованием картотеки ICDD и программы PCPDFWIN. Съемку рентгенограмм проводили в лаборатории РФА кафедры физики СамГТУ.

Реактивы, использованные в работе, имели следующие квалификации: NaF “х. ч.” (99.9%), NaCl “х. ч.” (99.9%), Na₂MoO₄ “ч. д. а.” (99.5 мас. %), Na₂WO₄ “ч. д. а.” (99.5%). Температуры плавления исходных солей, определенные методом ДТА (при точности измерения ±2.5°С) равны: NaF – 996°С, NaCl – 803°С, Na₂MoO₄ – 687°С, Na₂WO₄ – 695°С, т.е. влияние имеющихся примесей на температуры плавления исходных солей незначительно. Поэтому были приняты данные, приведенные в [22]. Исходные реактивы были предварительно высушены и после охлаждения в сухом боксе помещены в бюксы, а бюксы – в эксикатор с осушителем (силикагель).

Квазидвойная система NaF–Na₃ClWO₄ экспериментально изучена методом ДТА для проверки данных, имеющихся в литературе [23]. T - x -диаграмма системы представлена на рис. 3. В ходе исследования выявлено несоответствие экспериментальных данных с данными литературы. Согласно [23], температура плавления эвтектики составляет 598°С, состав – 17.5 экв. % NaF + 82.5 экв. % Na₃ClMoO₄. Выявленные в результате экспериментального исследования характеристики системы: температура плавления двойной эвтектики e_4 : 632°С, состав 16 экв. % NaF, 84 экв. % Na₃ClWO₄.

Стабильный треугольник NaF–Na₃ClMoO₄–Na₃ClWO₄ включает следующие системы ограни-

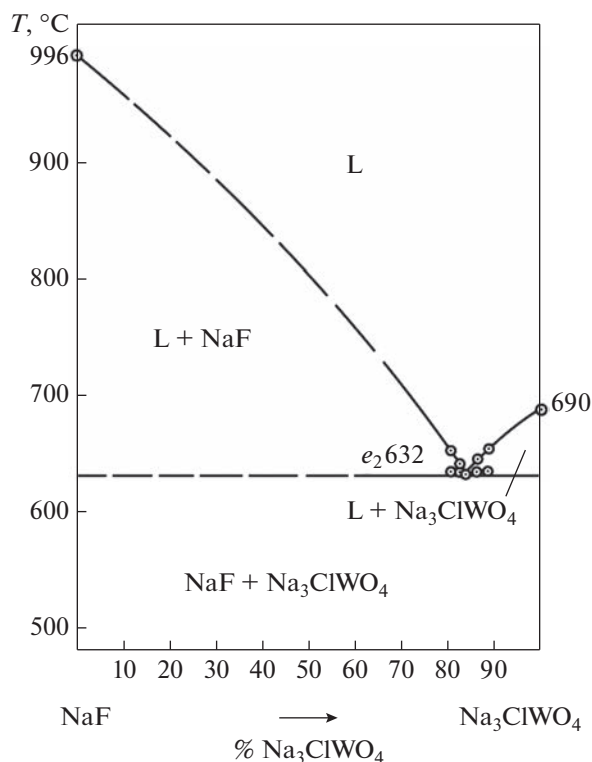


Рис. 3. T - x -диаграмма двухкомпонентной системы $\text{NaF-Na}_3\text{ClWO}_4$.

ния: две эвтектические системы $\text{NaF-Na}_3\text{ClMoO}_4$ и $\text{NaF-Na}_3\text{ClWO}_4$ с температурами плавления двойных эвтектик e_1 598°C, e_3 632°C соответственно; третья система $\text{Na}_3\text{ClMoO}_4\text{-Na}_3\text{ClWO}_4$ является системой с образованием НРТР без экстремумов. Проекция фазового комплекса трехкомпонентной системы на треугольник составов приведена на рис. 4. Для экспериментального исследования тройной системы в поле кристаллизации NaF был выбран политермический разрез AB [A (20 экв. % NaF , 80 экв. % $\text{Na}_3\text{ClMoO}_4$), B (20 экв. % NaF , 80 экв. % Na_3ClWO_4)] в соответствии с правилами проекционно-термографического метода [27]. T - x -диаграмма разреза AB приведена на рис. 5. Из диаграммы видно, что эффекты третичной кристаллизации отсутствуют. Исследованием политермического разреза, проведенного из вершины NaF через точку \bar{d} (рис. 6), выявлен состав и температура плавления сплава, отвечающего точке d , лежащей на моновариантной кривой e_1e_2 . Температура плавления 615°C, состав: NaF – 17 экв. %, $\text{Na}_3\text{ClMoO}_4$ – 38.5 экв. %, Na_3ClWO_4 – 38.5 экв. %. Проведен рентгенофазовый анализ образца состава, соответствующего точке d . Дифрактограмма приведена на рис. 7.

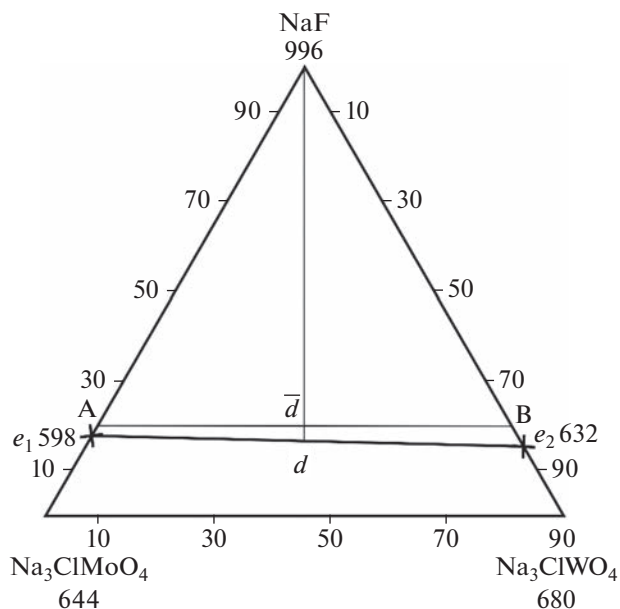


Рис. 4. Проекция ликвидуса на плоскость треугольника составов тройной системы $\text{NaF-Na}_3\text{ClMoO}_4\text{-Na}_3\text{ClWO}_4$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Геометрическим методом проведено разбиение на симплексы четырехкомпонентной системы $\text{NaF-NaCl-Na}_2\text{MoO}_4\text{-Na}_2\text{WO}_4$ и построено линейное древо фаз, которое представлено на рис. 2. Древо фаз состоит из стабильных тетраэдров $\text{NaF-NaCl-Na}_3\text{ClMoO}_4\text{-Na}_3\text{ClWO}_4$, пентатопа $\text{NaF-Na}_3\text{ClMoO}_4\text{-Na}_3\text{ClWO}_4\text{-Na}_3\text{FMoO}_4\text{-Na}_3\text{FWO}_4$ и гексатопа $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{-Na}_2\text{WO}_4\text{-Na}_3\text{ClMoO}_4\text{-Na}_3\text{ClWO}_4\text{-Na}_3\text{FMoO}_4\text{-Na}_3\text{FWO}_4$, разделенных стабильным треугольником $\text{NaF-Na}_3\text{ClMoO}_4\text{-Na}_3\text{ClWO}_4$ и квадратом $\text{Na}_3\text{ClMoO}_4\text{-Na}_3\text{ClWO}_4\text{-Na}_3\text{FMoO}_4\text{-Na}_3\text{FWO}_4$.

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование стабильного секущего треугольника $\text{NaF-Na}_3\text{ClMoO}_4\text{-Na}_3\text{ClWO}_4$. Обзор литературы по элементам ограничения системы показал, что две системы ограничения являются эвтектическими, а третья система – с образованием НРТР $\text{Na}_3\text{ClMo}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_4$. Таким образом, в стабильном треугольнике возможны следующие варианты прогноза числа и состава кристаллизующихся фаз: в случае устойчивости НРТР в треугольнике будут кристаллизоваться две твердые фазы – NaF и $\text{Na}_3\text{ClMo}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_4$; в случае распада НРТР в треугольнике будут три кристаллизующиеся фазы: NaF , ОТР на основе соединения $\text{Na}_3\text{ClMoO}_4$ и ОТР на основе соединения Na_3ClWO_4 .

Экспериментально подтверждено отсутствие четырехфазного равновесия, т.е. в стабильном треугольнике отмечены дивариантные и моно-

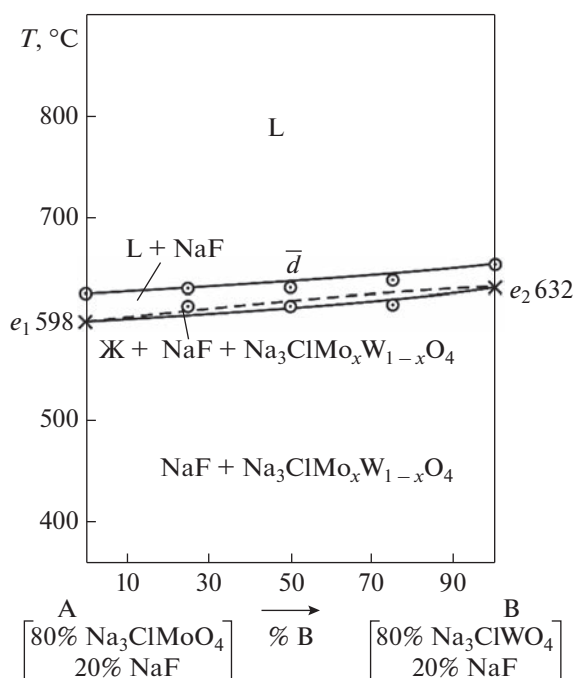


Рис. 5. T - x -диаграмма политермического разреза АВ.

риантное равновесия. T -диаграмма политермического разреза АВ, приведенная на рис. 5, подтверждает отсутствие точек невариантных равновесий. Линия первичной кристаллизации представлена на диаграмме в виде плавной кривой, она соответствует кристаллизации из расплава NaF. Линия вторичной кристаллизации представлена в виде “линзы”, она соответствует совместной кристаллизации NaF и НРТР $\text{Na}_3\text{ClMo}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_4$. Таким образом, экспериментально подтвержден первый вариант прогноза числа и состава кристаллизующихся фаз.

Исследованием политермического разреза, проведенного из вершины NaF через точку \bar{d} , выявлены состав и температура плавления сплава, отвечающего точке d , лежащей на моновариантной кривой e_1e_2 . Температура плавления 615°C , состав: NaF – 17 экв. %, $\text{Na}_3\text{ClMoO}_4$ – 38.5 экв. %, Na_3ClWO_4 – 38.5 экв. %.

Таблица 2. Фазовые равновесия в трехкомпонентной системе $\text{NaF}-\text{Na}_3\text{ClMoO}_4-\text{Na}_3\text{ClWO}_4$

Элемент диаграммы	Фазовое равновесие
Поля	
$e_1e_2\text{NaF}$	$L \rightleftharpoons \text{NaF}$
$e_1e_2\text{Na}_3\text{ClMoO}_4\text{Na}_3\text{ClWO}_4$	$L \rightleftharpoons \text{Na}_3\text{ClMo}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_4$
Линии	
e_1e_2	$L \rightleftharpoons \text{NaF} + \text{Na}_3\text{ClMo}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_4$

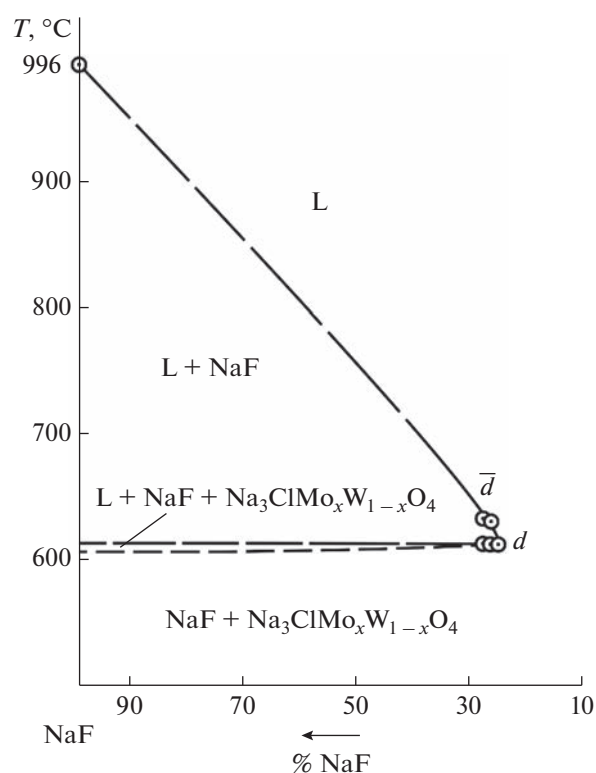


Рис. 6. T - x -диаграмма политермического разреза $\text{NaF} \rightarrow \bar{d} \rightarrow d$.

Рентгенофазовый анализ образца, состава точки d показал наличие в образце двух твердых фаз – фторида натрия и НРТР на основе соединений $\text{Na}_3\text{FMo}_{0.5}\text{W}_{0.5}\text{O}_4$ (рис. 7). Экспериментально установлено, что в системе отсутствуют точки невариантных равновесий. НРТР является устойчивым и не распадается.

Проекция ликвидуса стабильного треугольника представлена двумя полями – NaF и НРТР $\text{Na}_3\text{ClMo}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_4$. Наибольшее поле кристаллизации принадлежит фториду натрия – наиболее тугоплавкому компоненту. В табл. 2 приведены уравнения фазовых реакций для различных элементов фазовой диаграммы стабильного треугольника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование стабильно секущего треугольника $\text{NaF}-\text{Na}_3\text{ClMoO}_4-\text{Na}_3\text{ClWO}_4$ четырехкомпонентной системы $\text{NaF}-\text{NaCl}-\text{Na}_2\text{MoO}_4-\text{Na}_2\text{WO}_4$ методами ДТА и РФА. Установлено отсутствие в системе точек невариантных равновесий и наличие двух кристаллизующихся фаз на линии моновариантных равновесий – фторида натрия и НРТР $\text{Na}_3\text{ClMo}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_4$.

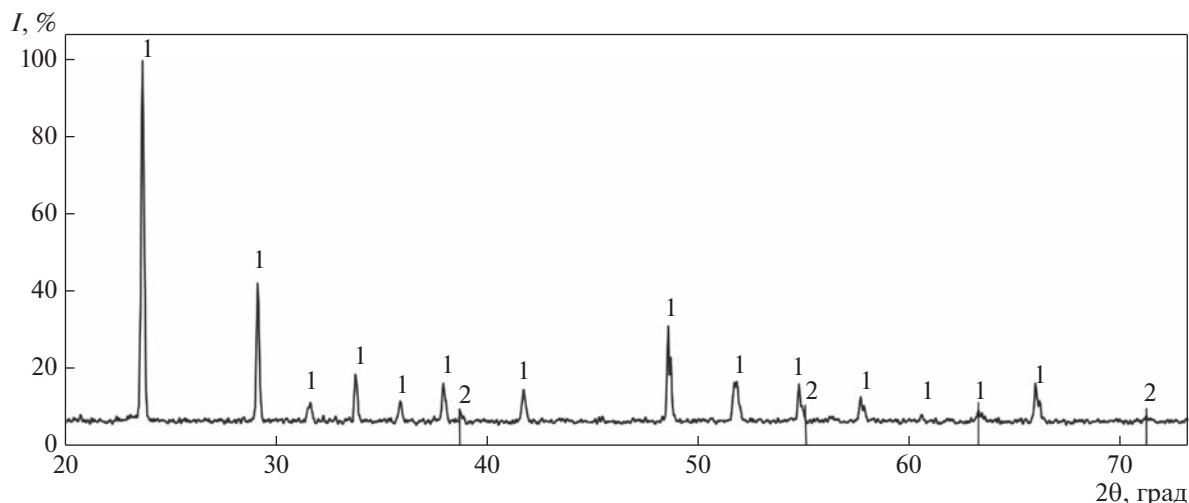


Рис. 7. Дифрактограмма образца состава точки *d*. Фаза 1 – НРTP $\text{Na}_3\text{ClMo}_{0.5}\text{W}_{0.5}\text{O}_4$; фаза 2 – NaF.

Выявлены характеристики сплава, отвечающего точке *d*, лежащей на моновариантной кривой, соединяющей двойные эвтектики e_1e_2 : температура плавления – 615°C, состав: NaF – 17 экв. %, $\text{Na}_3\text{ClMoO}_4$ – 38.5 экв. %, Na_3ClWO_4 – 38.5 экв. %.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации тема № FSSE-2023-0003 в рамках государственного задания самарского государственного технического университета.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочкаров Ж.А., Бисергаева Р.А. // *Материаловедение*. 2022. № 4. P. 12. <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2022-0-6-17-22>
2. Кочкаров Ж.А. // *Материаловедение*. 2022. № 6. P. 17. <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2022-0-4-12-18>
3. Kosov A.V., Semerikova O.L., Vakarin S.V. et al. // *Russ. Metallurgy (Metally)*. 2019. № 8. P. 803. <https://doi.org/10.1134/S0036029519080093>
4. Qin W., Xi X., Zhang Q., Zhang L. et al. // *Intern R. Electrochem Sc*. 2019. V. 14. № 11. P. 10420. <https://doi.org/10.20964/2019.11.15>
5. Черкесов З.А. // *Изв. ВУЗов. Сер.: хим. и хим. технология*. 2020. Т. 63. № 9. С. 2019. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20206309.6205>
6. Mamedov F.M., Babanly D.M., Amiraslanov I.R. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem*. 2020. V. 65. № 11 P. 1747. <https://doi.org/10.1134/S0036023620110121>
7. Aliev I.I., Mamedova N.A., Sadygov F.M. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem*. 2020. V. 65. № 10. P. 1585. <https://doi.org/10.1134/S0036023620100010>
8. 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>
9. 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>
10. Soliev L. // *Russ. J. Inorg. Chem*. 2020. V. 65. № 2. P. 212. <https://doi.org/10.1134/S0036023620020187>
11. Garkushin I.K., Burchakov A.V., Sukhareno M.A. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem*. 2020. V. 65. № 7. P. 1398. <https://doi.org/10.1134/S003602362009003X>
12. Kertman A.V., Ruseikina A.V. // *Russ. J. Inorg. Chem*. 2020. V. 65. № 11. P. 1756. <https://doi.org/10.1134/S003602362011008X>
13. Cherkasov D.G., Danilina V.V., Il'in K.K. // *Russ. J. Inorg. Chem*. 2021. V. 66. № 7. P. 883. <https://doi.org/10.1134/S0036023621060073>
14. Kistanova N.S., Mazunin S.A. // *Russ. J. Inorg. Chem*. 2020. V. 66. № 2. P. 250. <https://doi.org/10.1134/S0036023620090077>
15. Sukhareno M.A., Garkushin I.K., Osipov V.T. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem*. 2021. V. 66. № 2. P. 1527. <https://doi.org/10.1134/S0036023621100181>
16. Fedorov P.P. // *Russ. J. Inorg. Chem*. 2021. V. 66. № 2. P. 245. <https://doi.org/10.1134/S0036023621020078>
17. Elokhov A.M., Kudryashova O.S., Lesnov A.E. // *Russ. J. Phys. Chem. A*. 2019. V. 93. № 9. P. 1822. <https://doi.org/10.1134/S003602441909005X>
18. Kistanova N.S., Mukminov A.R., Koneva I.N. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem*. 2021. V. 66. № 11. P. 1736. <https://doi.org/10.1134/S0036023621110127>
19. Stankova A.V., Elokhov A.M., Lesnov A.E. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem*. 2020. V. 65. № 12. P. 1922. <https://doi.org/10.1134/S0036023620120177>

20. *Elokhov A.M., Kudryashova O.S.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V.67. № 11. P. 1818.
<https://doi.org/10.1134/s0036023622600903>
21. *Garkushin I.K., Burchakov A.V., Sukhareno M.A. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2020. V. 65. № 9. P. 1398.
<https://doi.org/10.1134/S003602362009003X>
22. Термические константы веществ. Вып. X. Таблицы принятых значений: Li, Na / Под ред. Глушко В.П. М., 1981. 297 с.
23. *Гаркушин И.К., Сухаренко М.А., Бурчаков А.В. и др.* Моделирование и исследование фазовых равновесных состояний и химического взаимодействия в системах из молибдатов и вольфраматов s^1 - и s^2 -элементов. М.: Инновационное машиностроение, 2022. 352 с.
24. *Бурчаков А.В., Гаркушин И.К., Милов С.Н. и др.* // Бутлеровские сообщения. 2019. Т. 60. № 10. С. 124.
25. *Мощенский Ю.В.* // Приборы и техника эксперимента. 2003. № 6. С. 143.
26. *Ковба Л.М.* Рентгенография в неорганической химии. М.: Изд-во МГУ, 1991. 256 с.
27. *Космынин А.С., Трунин А.С.* Проекционно-термографический метод исследования гетерогенных равновесий в конденсированных многокомпонентных системах. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2006. 183 с.