

Фазовый комплекс системы из галогенидов и сульфатов натрия и калия

Н. Н. Вердиев¹, А. Б. Алхасов¹, Л. С. Мурадова¹, М. М. Магомедов¹,
И. М. Кондратюк^{1,2}, П. А. Мусаева¹ и З. Н. Вердиева¹

¹ Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, пр. И. Шамиля, д. 39а, Махачкала, Республика Дагестан 367030, Россия

² Медицинский университет “Реавиз”, ул. Чапаевская, д. 227, Самара, Самарская область 443001, Россия

E-mail: leila.m-s@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2023 г.

Аннотация. Проведен анализ фазового комплекса пятикомпонентной взаимной системы Na^+ , $\text{K}^+||\text{F}^-, \text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{SO}_4^{2-}$ из восьми солей. Составы на основе системы перспективны в качестве теплонакопителей и теплоносителей в гелио- и атомной энергетике. Галогениды и сульфаты натрия и калия обладают высокими значениями теплот фазового перехода, а сульфат натрия обладает рядом полиморфных превращений, позволяющих увеличить количество и диапазон аккумуляции тепловой энергии, т.е. позволяет аккумулировать и высвобождать тепловую энергию и при нескольких фазовых переходах, как при плавлении–кристаллизации, так и в твердом состоянии. В ходе изучения системы проведено, на основе анализа граничных элементов системы, разбиение на симплексы системы Na^+ , $\text{K}^+||\text{F}^-, \text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{SO}_4^{2-}$ и построено древо фаз системы. Исследования представляют также научный интерес в плане развития теории и практики физико-химического анализа. <https://doi.org/10.33849/2024307>

1. ВВЕДЕНИЕ

Эвтектические составы из галогенидов и сульфатов щелочных металлов обладают высокими значениями энтальпий фазовых превращений, широким интервалом температур кристаллизаций, низкой летучестью, малым коэффициентом объемного расширения, высокой электропроводностью, распространенностью в природе и относительной дешевизной. Такие солевые расплавы востребованы в ряде отраслей промышленности, в частности, в гелио- и атомной энергетике в качестве теплоносителей, теплонакопителей, а также необходимы для совершенствования технологий функциональных материалов [1–10]. Объект исследований — пятикомпонентная взаимная система Na^+ , $\text{K}^+||\text{F}^-, \text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{SO}_4^{2-}$. Выбор данного сочетания солей обусловлен тем, что сульфат натрия обладает рядом полиморфных превращений, позволяющих увеличить количество и диапазон аккумуляции тепловой энергии, т.е. позволяет аккумулировать и высвобождать тепловую энергию за счет теплоты нескольких фазовых переходов, как при плавлении–кристаллизации, так и в твердом состоянии. Исследования предприняты с целью выявления сочетаний компонентов системы Na^+ , $\text{K}^+||\text{F}^-, \text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{SO}_4^{2-}$, обладающих наибольшими значениями энтальпий фазовых превращений и, следовательно, максимальной возможностью аккумуляции тепловой энергии.

2. АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТОВ ОГРАНИЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ИЗ ФТОРИДОВ, ХЛОРИДОВ, БРОМИДОВ И СУЛЬФАТОВ НАТРИЯ И КАЛИЯ

Теоретические исследования и анализ системы Na^+ , $\text{K}^+||\text{F}^-, \text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{SO}_4^{2-}$ проведены в соответствии с общими алгоритмами комплексной методологии исследования многокомпонентных систем (КМИС) [11]. Из проведенного обзора по состоянию изученности

системы Na^+ , $\text{K}^+||\text{F}^-, \text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{SO}_4^{2-}$ следует, что 12 двухкомпонентных, 8 трехкомпонентных и 6 трехкомпонентных взаимных систем, являющихся элементами ограничения исследуемого объекта, исследованы ранее дифференциально-термическим анализом (ДТА), визуально-политермическим методом (ВПМ) и рентгенофазовым анализом (РФА) [12–20]. По двум четырехкомпонентным: $\text{NaF} - \text{NaCl} - \text{NaBr} - \text{Na}_2\text{SO}_4$; $\text{KF} - \text{KCl} - \text{KBr} - \text{K}_2\text{SO}_4$, и двум четырехкомпонентным взаимным системам: Na^+ , $\text{K}^+||\text{F}^-, \text{Br}^-, \text{SO}_4^{2-}$; Na^+ , $\text{K}^+||\text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{SO}_4^{2-}$ в литературных источниках нет информации. Краткие сведения об изученных системах, необходимые для разбиения исследуемой системы на симплексы, представлены далее:

Двухкомпонентные системы

1. $\text{NaF} - \text{NaCl}$ [21]. Эвтектика: при 673 °С и 34,5 экв.% фторида натрия. Твердые фазы: NaF , NaCl . Метод исследования: ДТА.
2. $\text{NaF} - \text{NaBr}$ [22]. Эвтектика при 642 °С и 73 экв.% бромидов натрия. Твердые фазы: NaF , NaBr . Метод исследования: ДТА.
3. $\text{NaCl} - \text{NaBr}$ [21]. Непрерывный ряд твердых растворов с минимумом при 744 °С и 30 экв.% хлорида натрия. Метод исследования: ДТА.
4. $\text{NaF} - \text{Na}_2\text{SO}_4$ [21]. Эвтектика: E_1 при 747 °С и 17,5 экв.% фторида натрия. Твердые фазы: Na_2SO_4 , Na_3FSO_4 ; E_2 при 779 °С и 44 экв.% фторида натрия. Твердые фазы: NaF , Na_3FSO_4 . Дистектика Na_3FSO_4 : при 784 °С и 35 экв.% фторида натрия. Метод исследования: ДТА.
5. $\text{NaCl} - \text{Na}_2\text{SO}_4$ [21]. Эвтектика: при 628 °С и 36 экв.% хлорида натрия. Твердые фазы: NaCl , Na_2SO_4 . Метод исследования: ДТА.
6. $\text{NaBr} - \text{Na}_2\text{SO}_4$ [21]. Эвтектика при 640 °С и 58 экв.% сульфата натрия. Твердые фазы: NaBr , Na_2SO_4 . Метод исследования: ДТА.

7. $\text{KF} - \text{KCl}$ [21]. Эвтектика: при 606°C и 55 экв.% хлорида калия. Твердые фазы: KF , KCl . Метод исследования: ВПМ.
8. $\text{KF} - \text{KBr}$ [22]. Эвтектика: при 580°C и 40 экв.% фторида калия. Твердые фазы: KF , KBr . Метод исследования: ВПМ.
9. $\text{KCl} - \text{KBr}$ [22]. В системе непрерывный ряд твердых растворов с минимумом при 724°C и 40 экв.% хлорида калия.
10. $\text{KF} - \text{K}_2\text{SO}_4$ [21]. Эвтектика E_1 при 776°C и 29.5 экв.% сульфата калия. Твердые фазы: KF , K_3FSO_4 . E_2 при 865°C и 72.5 экв.% сульфата калия. Дистектика K_3FSO_4 при 871°C . Твердые фазы: K_2SO_4 , K_3FSO_4 . Метод исследования: ДТА.
11. $\text{KCl} - \text{K}_2\text{SO}_4$ [21]. Эвтектика при 690°C и 60 экв.% KCl . Твердые фазы: KCl , K_2SO_4 . Метод исследования: ВПМ.
12. $\text{KBr} - \text{K}_2\text{SO}_4$ [21]. Эвтектика: при 682°C и 69 экв.% бромидов калия. Твердые фазы: KBr , K_2SO_4 . Метод исследования: ДТА.

Трехкомпонентные системы

1. $\text{NaF} - \text{NaCl} - \text{NaBr}$ [13]. Поверхность ликвидуса системы состоит из полей кристаллизации фторида натрия и твердых растворов $\text{Na}_x\text{Br}_{(1-x)}\text{Cl}$.
2. $\text{NaF} - \text{NaCl} - \text{Na}_2\text{SO}_4$ [12]. Поверхность ликвидуса системы состоит из полей кристаллизаций исходных компонентов и соединения конгруэнтного плавления Na_3FSO_4 . Эвтектика E_1 при 602°C и 7 экв.% NaF , 31 экв.% NaCl , 62 экв.% Na_2SO_4 . Твердые фазы: Na_3FSO_4 , NaCl , Na_2SO_4 . Эвтектика E_2 при 624°C и 27 экв.% NaF , 41 экв.% NaCl и 32 экв.% Na_2SO_4 . Твердые фазы: NaF , NaCl , Na_3FSO_4 . Квазибинарная система $\text{Na}_3\text{FSO}_4 - \text{NaCl}$. Эвтектика при 632°C и 40 экв.% хлорида натрия. Твердые фазы: Na_3FSO_4 , NaCl . Метод исследования: ВПМ.
3. $\text{NaF} - \text{NaBr} - \text{Na}_2\text{SO}_4$ [14]. Поверхность ликвидуса системы состоит из полей кристаллизаций исходных компонентов и соединения конгруэнтного плавления Na_3FSO_4 . В квазибинарной системе $\text{NaBr} - \text{Na}_3\text{FSO}_4$ эвтектика при 595°C и 32 экв.% бромидов натрия. В системе две тройные эвтектики: E_1 при 579°C и 8.5 экв.% NaF , 38 экв.% NaBr , 53.5 экв.% Na_2SO_4 . Твердые фазы: NaBr , Na_2SO_4 , Na_3FSO_4 . E_2 эвтектика при 587°C и 22.3 экв.% NaF , 53.7 экв.% NaBr , 24 экв.% Na_2SO_4 . Твердые фазы: NaF , NaBr , Na_3FSO_4 . Метод исследования: ДТА, РФА.
4. $\text{NaCl} - \text{NaBr} - \text{Na}_2\text{SO}_4$ [12]. Поверхность ликвидуса системы состоит из двух полей кристаллизаций: Na_2SO_4 и твердых растворов $\text{NaCl}_x\text{Br}_{(1-x)}$. Метод исследования: ВПМ.
5. $\text{KF} - \text{KCl} - \text{KBr}$ [15, 16]. Поверхность ликвидуса системы состоит из полей кристаллизации фторида калия и твердых растворов $\text{KCl}_x\text{Br}_{(1-x)}$.
6. $\text{KF} - \text{KCl} - \text{K}_2\text{SO}_4$ [12]. Поверхность ликвидуса системы состоит из полей кристаллизации исходных компонентов и соединения конгруэнтного плавления K_3FSO_4 . Эвтектика E_1 при 587°C и 41 экв.% фторида калия, 47.5 экв.% хлорида калия и 11.5 экв.% сульфата калия. Твердые фазы: KF , KCl , K_3FSO_4 . Эвтектика E_2 при 642°C и 13.5 экв.% фторида калия, 50.5 экв.% хлорида калия и 36 экв.% сульфата калия. Твердые фазы: KCl , K_2SO_4 , K_3FSO_4 . Квазибинарная система $\text{K}_3\text{FSO}_4 - \text{KCl}$. Эвтектика при 644°C и 51.5 экв.% хлорида калия. Твердые фазы: K_3FSO_4 , KCl . Метод исследования: ВПМ.
7. $\text{KF} - \text{KBr} - \text{K}_2\text{SO}_4$ [17, 18]. Поверхность ликвидуса системы состоит из полей кристаллизации исходных компонентов и соединения конгруэнтного плавления K_3FSO_4 . Эвтектики E_1 при 657°C и 27.0 экв.% KF ; 55.0 экв.% KBr ; 18.0 экв.% D и E_2 при 604°C и 66.0 экв.% KBr ; 2.0 экв.% K_2SO_4 и 32.0 экв.% D .
8. $\text{KCl} - \text{KBr} - \text{K}_2\text{SO}_4$ [12]. Поверхность ликвидуса системы имеет поля кристаллизации сульфата калия и твердых растворов $\text{KCl}_x\text{Br}_{(1-x)}$. Линия разграничения этих полей и соединяющая двухкомпонентные эвтектики экстремумом не имеет.

Трехкомпонентные взаимные системы

1. $\text{Na}^+, \text{K}^+||\text{F}^-, \text{Cl}^-$ [12]. Система необратимо-взаимная, изучена ВПА. Твердые растворы $\text{NaCl} - \text{KCl}$ внутри системы распадаются ниже $610-620^\circ\text{C}$. Стабильная диагональ $\text{NaF} - \text{KCl}$. Перевальная эвтектическая точка при 650°C и 25.5 экв.% фторида натрия. В системе две эвтектики: E_1 при 570°C и 14 экв.% фторида натрия, 39.5 экв.% фторида калия и 46.5 экв.% хлорида калия. Твердые фазы: NaF , KF , KCl . E_2 при 606°C и 17 экв.% фторида натрия, 60.5 экв.% хлорида натрия и 22.5 экв.% хлорида калия. Твердые фазы: NaF , NaCl , KCl . Поверхность ликвидуса системы состоит из полей кристаллизаций исходных солей.
2. $\text{Na}^+, \text{K}^+||\text{F}^-, \text{Br}^-$ [12, 19, 23]. Необратимо-взаимная система со стабильной диагональю $\text{NaF} - \text{KBr}$, перевальная при 650°C и 23 экв.% фторида натрия. Поверхность ликвидуса системы представлена четырьмя полями кристаллизаций исходных компонентов. Эвтектики E_1 при 570°C и 13 экв.% NaF , 31 экв.% KF , 56 экв.% KBr и E_2 при 600°C и 12.5 экв.% NaF , 50 экв.% NaBr , 37.5 экв.% KBr .
3. $\text{Na}^+, \text{K}^+||\text{Cl}^-, \text{Br}^-$ [20, 23]. Поверхность ликвидуса системы состоит из полей кристаллизаций фторидов натрия, калия и НРТР $\text{KCl}_x\text{Br}_{(1-x)}$. Эвтектика при 570°C и 31 экв.% фторида калия, 13 экв.% фторида натрия, 56 экв.% бромидов калия. Твердые фазы: NaF , KF , $\text{KCl}_x\text{Br}_{(1-x)}$. Метод исследования: ДТА. Диагональное сечение $\text{NaF} - \text{KCl}$ стабильное. Эвтектика при 649°C и 20 экв.% фторида натрия.
4. $\text{Na}^+, \text{K}^+||\text{F}^-, \text{SO}_4^{2-}$ [23]. Диагональное сечение $\text{NaF} - \text{K}_2\text{SO}_4$. Сечение $\text{NaF} - \text{K}_3\text{FSO}_4$ стабильное, эвтектика при 732°C и 39 экв.% фторида натрия. Твердые фазы: K_3FSO_4 , NaF . Сечение $\text{K}_2\text{SO}_4 - \text{Na}_3\text{FSO}_4$ стабильное. Твердые фазы: K_2SO_4 , K_3FSO_4 . Поверхность ликвидуса системы состоит из полей кристаллизаций NaF , KF , K_3FSO_4 , Na_3FSO_4 и поля твердых растворов $\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{K}_2\text{SO}_4$.

Авторами установлено методом ДТА, что в системе ограничения $\text{NaF} - \text{NaCl} - \text{NaBr} - \text{Na}_2\text{SO}_4$ твердые растворы на основе хлоридов и бромидов натрия не распадаются, в двух симплексах получены данные по температурам плавления минимумов, соответствующих совместной кристаллизации фаз: в симплексе $\text{NaF} - \text{NaCl} - \text{NaBr} - \text{Na}_3\text{FSO}_4$ температура составляет 682°C , а в симплексе $\text{NaCl} - \text{NaBr} - \text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{Na}_3\text{FSO}_4$ температура минимума — 565°C . В системе $\text{Na}^+, \text{K}^+||\text{Br}^-, \text{SO}_4^{2-}$ в качестве стабильной выбрана пара солей $\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{KBr}$,

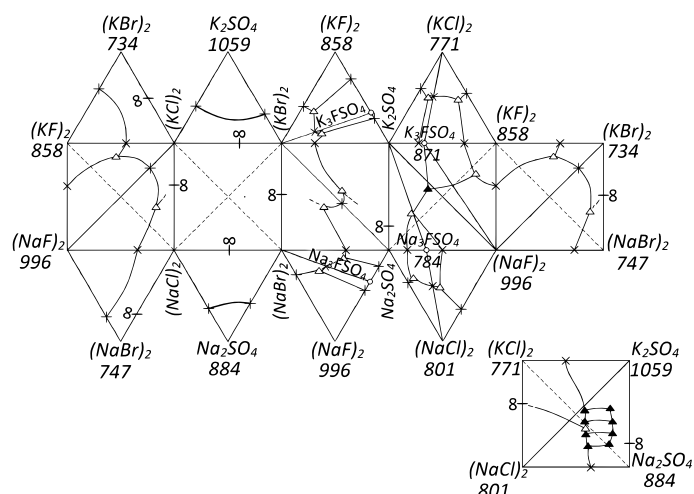


Рисунок 1. Развертка элементов ограничения пятикомпонентной взаимной системы $\text{Na}^+, \text{K}^+ || \text{F}^-, \text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{SO}_4^{2-}$.

Таблица 1. Матрица смежности вершин системы Na^+ , $\text{K}^+ || \text{F}^-, \text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{SO}_4^{2-}$

[illegible]

сделано заключение о том, что также требует уточнения характер ликвидуса в системе $\text{Na}^+, \text{K}^+ \parallel \text{Cl}^-, \text{SO}_4^{2-}$.

Для построения развертки и разбиения системы $\text{Na}^+, \text{K}^+ || \text{F}^-, \text{Cl}^-, \text{Br}^-, \text{SO}_4^{2-}$ на симплексы использована информация по элементам ограничения. При анализе развертки элементов ограничения изучаемой системы (рисунок 1), построенной с использованием данных литературы, приведенных выше в тексте статьи, авторы пришли к выводу об отсутствии разбиения в трехкомпонентной взаимной системе $\text{Na}^+, \text{K}^+ || \text{Cl}^-, \text{Br}^-$ по причине образования НРТР (непрерывного ряда твердых растворов) между компонентами системы и невозможности, как следствие, указать существование стабильной пары солей. В остальном разбиение проведено по данным, представленным на развертке системы.

Фазовый комплекс системы $Na^+, K^+//F^-, Cl^-, Br^-, SO_4^{2-}$

Выявление фазового комплекса системы Na^+ , $\text{K}^+||\text{F}^-$, Cl^- , Br^- , SO_4^{2-} проведено с использованием теории графов. Была сформирована матрица смежности вершин системы, представленная в таблице 1.

Матрица построена с учетом образующихся в системе соединений конгруэнтного плавления Na_3FSO_4 и K_3FSO_4 . В системе $\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{K}_2\text{SO}_4$ указано существование соединения NaKSO_4 при температуре до 470°C , которое не учитывалось при разбиении. Матрица ис-

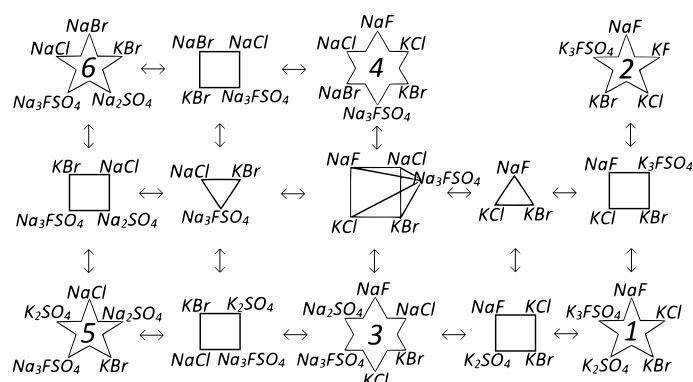


Рисунок 2. Древо фаз системы Na^+ , $\text{K}^+||\text{F}^-$, Cl^- , Br^- , SO_4^{2-} .

ПОЛЬЗОВАНА ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ ЛОГИЧЕСКОГО ВЫРАЖЕНИЯ:

$$(X_1 + X_4) * (X_2 + X_5 X_{10}) * (X_3 + X_5 X_{10}) * (X_4 + X_5 X_6 X_{10}) * (X_5 + X_8 X_9) * (X_9 + X_{10}).$$

Решением логического выражения с использованием приемов булевой алгебры, получен набор графов метастабильного комплекса системы:

1. $X_2X_3X_4X_5X_9$;
2. $X_2X_3X_4X_8X_9$;
3. $X_3X_4X_5X_{10}$;
4. $X_4X_5X_8X_{10}$;
5. $X_1X_3X_5X_6X_{10}$;
6. $X_1X_5X_6X_8X_{10}$;

Путем выписывания из графов недостающих вершин системы, выявлен стабильный секущий комплекс исследуемой системы:

1. $X_1X_6X_7X_8X_{10}$: $\text{NaF} - \text{KCl} - \text{KBr} - \text{K}_2\text{SO}_4 - \text{K}_3\text{FSO}_4$
2. $X_1X_5X_6X_7X_{10}$: $\text{NaF} - \text{KF} - \text{KCl} - \text{KBr} - \text{K}_3\text{FSO}_4$
3. $X_1X_2X_6X_7X_8X_9$: $\text{NaF} - \text{NaCl} - \text{KCl} - \text{KBr} - \text{K}_2\text{SO}_4 - \text{Na}_3\text{FSO}_4$
4. $X_1X_2X_3X_6X_7X_9$: $\text{NaF} - \text{NaCl} - \text{NaBr} - \text{KCl} - \text{KBr} - \text{Na}_3\text{FSO}_4$
5. $X_2X_4X_7X_8X_9$: $\text{NaCl} - \text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{KBr} - \text{K}_2\text{SO}_4 - \text{Na}_3\text{FSO}_4$
6. $X_2X_3X_4X_7X_9$: $\text{NaCl} - \text{NaBr} - \text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{KBr} - \text{Na}_3\text{FSO}_4$

Из выявленного набора графов сформировано циклическое фазовое дерево (рисунок 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ литературных данных по элементам ограничения пятикомпонентной взаимной системы Na^+ , $\text{K}^+||\text{F}^-$, Cl^- , Br^- , SO_4^{2-} из восьми солей. Построена развертка системы.
2. Показано, что в системе ограничения $\text{NaF} - \text{NaCl} - \text{NaBr} - \text{Na}_2\text{SO}_4$ твердые растворы на основе хлоридов и бромидов натрия не распадаются, также получены данные по температурам плавления минимумов, соответствующих совместной кристаллизации фаз системы: в симплексе $\text{NaF} - \text{NaCl} - \text{NaBr} - \text{Na}_3\text{FSO}_4$ температура составляет 682°C , а в симплексе $\text{NaCl} - \text{NaBr} - \text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{Na}_3\text{FSO}_4$ температура минимума — 565°C .
3. Фазовый комплекс системы описывается циклическим древом фаз, состоит из 2 гексатопов и пента-топов, объединенных общими секущими элементами меньшей мерности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вердиев Н Н, Вердиева З Н, Алхасов А Б, Кондратюк И М, Магомедов М М и Мусаева П А 2023 *Грозненский естественнонаучный бюллетень* **8** 108–14
2. Трифонов К И, Ларионов А С, Кротов В Е и Никифоров А Ф 2021 *Расплавы* **2** 113–17
3. Демина М А, Егорова Е М, Гаркушин И К, Бурчаков А В и Игнатъева Е О 2021 *ЖФХ* **95** 955–57
4. Вердиев Н Н, Гаркушин И К, Бурчаков А В, Вердиева З Н, Кондратюк И М и Егорова Е М 2021 *ТВТ* **59** 82–85
5. Вердиев Н Н, Гаркушин И К, Бурчаков А В, Вердиева З Н, Алхасов А Б, Мусаева П А, Кондратюк И М и Егорова Е М 2020 *Неорганические материалы* **56** 1243–51
6. Бурчаков А В, Гаркушин И К и Емельянова У А 2023 *ЖНХ* **68** 952–60
7. Финогенов А А, Гаркушин И К и Фролов Е И 2022 *ФиХС* **48** 783–90
8. Гаркушин И К, Фролов Е И и Сырова В И 2022 *ЖНХ* **63** 640–44
9. Некрасов С А 2021 *Теплоэнергетика* **8** 5–16
10. Трунин А С и Космынин А С 1977 *Проекционно-термографический метод исследования гетерогенных равновесий в конденсированных многокомпонентных системах* (Деп. в ВИНТИ 12.04.77. № 1372–77)
11. Трунин А С 1977 *Комплексная методология исследования многокомпонентных систем* (Самара: СамГТУ)
12. Воскресенская Н К, Евсеева Н Н, Беруль С И и Верещетина И П 1961 *Справочник по плавкости систем из безводных неорганических солей (Системы тройные и более сложные т. 2)* (Москва: Изд-во Акад. наук СССР, [Ленингр. отд-ние])
13. Вердиев Н Н, Искендеров Э Г, Арбуханова П А и Амадзиев А М 2006 *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки* **S5** 56–61
14. Сырова В И, Фролов Е И и Гаркушин И К 2017 *ЖНХ* **62** 381–84
15. Вердиев Н Н, Арбуханова П А и Искендеров Э Г 2009 *ЖНХ* **54** 129–34
16. Verdiev N N, Arbukhanova P A and Iskenderov E G 2009 *J. of Inorgan. Chem* **54** 128–33
17. Сырова В И, Фролов Е И и Гаркушин И К 2016 *ЖНХ* **61** 818–23
18. Syrova V I, Frolov E I and Garkushin I K 2016 *J. of Inorgan. Chem* **61** 781–86
19. Егорцев Г Е, Гаркушин И К и Истомова М А 2005 *Химия и химическая технология* **48** 86–87
20. Посыпайко В И и Алексеева Е А 1976 *Диаграммы плавкости солевых систем. Часть 5. Тройные взаимные системы* (Москва: Химия)
21. Посыпайко В И, Алексеева Е А и Васина Н А 1979 *Диаграммы плавкости солевых систем. Часть 3. Двойные системы с общим катионом* (Москва: Металлургия)
22. Воскресенская Н К, Евсеева Н Н, Беруль С И и Верещетина И П 1961 *Справочник по плавкости систем из безводных неорганических солей (Двойные системы т. 1)* (Москва: Изд-во Акад. наук СССР, [Ленингр. отд-ние])
23. Искендеров Э Г 2009 *Фазовые равновесия и химические превращения на основе фторидов, хлоридов, бромидов, молибдатов натрия и калия* диссертация Дагестан. гос. ун-т Махачкала