

**СИСТЕМА  $(LiF)_2 - (NaF)_2 - (NaCl)_2 - Na_3FSO_4$**

**Н.Н. Вердиев, С.М. Омарова, А.Б. Алхасов, У.Г. Магомедбеков, У.Г. Гасангаджиева,  
В.И. Дворянчиков**

Надинбег Надинбегович Вердиев \*, Алибек Басирович Алхасов

Лаборатория аккумуляции низкопотенциального тепла и солнечной энергии, Филиал объединенного института высоких температур РАН, просп. И. Шамиля, 39 А, Махачкала, Российская Федерация, 367015

E-mail: verdiev55@mail.ru \*, alibek\_alhasov@mail.ru

Сабина Мурадовна Омарова

Кафедра термодинамики теплопередачи и энергосбережения, Московский политехнический университет, ул. Б. Семеновская, 38, Москва, Российская Федерация, 107023

E-mail: sabinom@mail.ru

Ухумаали Гаджиевич Магомедбеков, Умукусум Гусейновна Гасангаджиева

Кафедра неорганической химии, Дагестанский государственный университет, ул. Батырая, 4, Махачкала, Российская Федерация, 367025

E-mail: ukhmag@mail.ru, ugga74@mail.ru

Василий Иванович Дворянчиков

Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН, просп. И. Шамиля, 39 А, Махачкала, Российская Федерация, 367000

E-mail: vasilij\_dv01@mail.ru

*Дифференциально-термическим методом физико-химического анализа исследован стабильный тетраэдр  $(LiF)_2 - (NaF)_2 - (NaCl)_2 - Na_3FSO_4$  четырехкомпонентной взаимной системы  $Li, Na // F, Cl, SO_4$ . Установлено, что система эвтектическая. Эвтектика кристаллизуется при  $543\text{ }^\circ\text{C}$ . Система  $Li, Na // F, Cl, SO_4$  характеризуется наличием трех соединений, одной дистектики  $Na_3FSO_4$  и двух перитектических соединений  $Li_2Na_4(SO_4)_3, LiNaSO_4$ . Четырехкомпонентные взаимные системы, в элементы ограничения которых входят необратимо-взаимные или сингулярные трехкомпонентные системы без соединений, разбиваются, как правило, на три тетраэдра. В данном случае разбиения диаграммы составов системы  $Li, Na // F, Cl, SO_4$  произведено с учетом соединений инконгруэнтного и конгруэнтного плавлений, в результате выявлены семь тетраэдров: 1.  $(LiF)_2 - (LiCl)_2 - Li_2SO_4 - (NaCl)_2$ ; 2.  $(LiF)_2 - Li_2SO_4 - (NaCl)_2 - Na_3FSO_4$ ; 3.  $Li_2SO_4 - Na_2SO_4 - (NaCl)_2 - Na_3FSO_4$ ; 4.  $(LiF)_2 - (NaF)_2 - (NaCl)_2 - Na_3FSO_4$ ; 5.  $Li_2Na_4(SO_4)_3 - LiNaSO_4 - Na_3FSO_4 - (NaCl)_2$ ; 6.  $LiNaSO_4 - Na_3FSO_4 - Li_2SO_4 - (NaCl)_2$ ; 7.  $Li_2Na_4(SO_4)_3 - Na_3FSO_4 - Na_2SO_4 - (NaCl)_2$ . Проведенным нами теоретическим анализом граничных элементов этих тетраэдров, а затем и исследованием ДТА единичных составов в каждом тетраэдре, установлено, что неинвариантные точки из тетраэдров, образованных с участием соединений инконгруэнтного плавления, мигрируют в границах с ними тетраэдров с инверсией в четверные перитектики. Отсутствие неинвариантных точек в тетраэдрах, образованных с участием соединений инконгруэнтного плавления:  $Li_2Na_4(SO_4)_3 - LiNaSO_4 - Na_3FSO_4 - (NaCl)_2$ ;  $LiNaSO_4 - Na_3FSO_4 - Li_2SO_4 - (NaCl)_2$ ;  $Li_2Na_4(SO_4)_3 - Na_3FSO_4 - Na_2SO_4 - (NaCl)_2$ , подтверждается отсутствием на термограммах ДТА единичных составов этих тетраэдров термоэффектов совместной кристаллизации четырех фаз. В данной работе для экспериментального исследования выбран тетраэдр  $(LiF)_2 - (NaF)_2 - (NaCl)_2 - Na_3FSO_4$ , в состав которого не входят перитектические соединения, и в этой системе локализован только один эвтектический состав. Выбор данной системы для экспериментального исследования обусловлен и тем, что в ее состав входит фторид лития, обладающий относительно большим значением энтальпии фазового перехода, что является одним из определяющих факторов при*

*подборе теплонакопителей, теплоносителей для устройств, аккумулирующих тепловую и солнечную энергию. Также в систему входят соли, широко применяемые в целлюлозно-бумажной, текстильной, пищевой, строительной промышленности. Исследование диаграмм фазовых равновесий таких систем позволит расширить области применения низкотемпературных эвтектических составов.*

**Ключевые слова:** эвтектический состав, диаграмма составов, диаграмма состояния, дифференциально-термический метод физико-химического анализа, теплонакопители, теплоносители, расплавленные электролиты химических источников тока

UDC: 543.226.541.123.7

**SYSTEM (LiF)<sub>2</sub> – (NaF)<sub>2</sub> – (NaCl)<sub>2</sub> – Na<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub>**

**N.N. Verdiev, S.M. Omarova, A.B. Alkhasov, U.G. Magomedbekov, U.G. Gasangadzhieva, V.I. Dvoryanchikov**

Nadinbeg N. Verdiev \*, Alibek B. Alkhasov

Laboratory Accumulation of Low-Grade Heat and Solar Energy, branch of the Joint Institute for High Temperatures, RAS, I. Shamil ave., 39 A, Makhachkala, 367015, Russia

E-mail: verdiev55@mail.ru \*, alibek\_alhasov@mail.ru

Sabina M. Omarova

Department of Thermodynamics and Heat Energy Saving, Moscow Polytechnical University, B. Semenovskaya ave., 38, Moscow, 107023, Russia

E-mail: sabinom@mail.ru

Uhumaali G. Magomedbekov, Umukusum G. Gasangadzhieva

Department of Inorganic chemistry, Dagestan State University, Batyrov st., 4, Makhachkala, 367025, Russia

E-mail: ukhmag@mail.ru, ugga74@mail.ru

Vasilij I. Dvoryanchikov

Institut of Problem of Geothermia, Dagestan Scientific Centre of RAS, Shamil ave., 39 A, Makhachkala, 367000, Russia

E-mail: vasilij\_dv01@mail.ru

*With the differential-thermal method of physico-chemical analysis the stable tetrahedron (LiF)<sub>2</sub> – (NaF)<sub>2</sub> – (NaCl)<sub>2</sub> – Na<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub> of four-component mutual system Li, Na // F, Cl, SO<sub>4</sub>. It was established that the system is eutectic one. The eutectic crystallizes at 543 °C. The system Li, Na // F, Cl, SO<sub>4</sub> is characterized by the presence of three compounds: one detectice (Na<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub>) and two peritectically compounds Li<sub>2</sub>Na<sub>4</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, LiNaSO<sub>4</sub>. Four-component reciprocal systems, in the elements of faceting of which include irreversibly-reciprocal or singular three-component systems without compounds, are divided, as a rule, into three tetrahedra. In this case, the composition diagrams of the Li, Na / F, Cl, SO<sub>4</sub> system are decomposed taking into account the incongruent and congruent melting compounds, resulting in the revealing the seven tetrahedra.: 1. (LiF)<sub>2</sub> – (LiCl)<sub>2</sub> – Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – (NaCl)<sub>2</sub>; 2. (LiF)<sub>2</sub> – Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – (NaCl)<sub>2</sub> – Na<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub>; 3. Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – (NaCl)<sub>2</sub> – Na<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub>; 4. (LiF)<sub>2</sub> – (NaF)<sub>2</sub> – (NaCl)<sub>2</sub> – Na<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub>; 5. Li<sub>2</sub>Na<sub>4</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> – LiNaSO<sub>4</sub> – Na<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub> – (NaCl)<sub>2</sub>; 6. LiNaSO<sub>4</sub> – Na<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub> – Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – (NaCl)<sub>2</sub>; 7. Li<sub>2</sub>Na<sub>4</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> – Na<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub> – Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – (NaCl)<sub>2</sub>. The theoretical analysis of the granular elements of these tetrahedra carried out by us, and later the investigation of the DTA of single compounds in each tetrahedron, shows that the nonvariant points from tetrahedra formed with the participation of incongruent melting compounds migrate to the tetrahedra bordering them with inversion into quaternary peritectics. The lack nonvariant points in the tetrahedra formed with the participation of the incongruent melting compounds: Li<sub>2</sub>Na<sub>4</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> – LiNaSO<sub>4</sub> – Na<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub> – (NaCl)<sub>2</sub>; LiNaSO<sub>4</sub> – Na<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub> – Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – (NaCl)<sub>2</sub>; Li<sub>2</sub>Na<sub>4</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> – Na<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub> – Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – (NaCl)<sub>2</sub>, confirmed by the absence in the thermograms of DTA unit*

*composition of these tetrahedrons thermoeffect joint crystallization of four phases. In this study, a tetrahedron  $(LiF)_2 - (NaF)_2 - (NaCl)_2 - Na_3FSO_4$  was selected for experimental investigation, in a composition that does not include peritectic compounds and only one eutectic composition is localized in this system. The choice of this system for experimental research is also due to the fact that its composition includes lithium fluoride, which has a relatively large enthalpy of phase transition, which is one of the determining factors in the selection of heat accumulators, heat carriers for devices that store heat and solar energy. Also the system includes salts widely used in the pulp and paper, textile, food, construction industries. Investigation of phase equilibrium diagrams of such systems allows expanding the areas of application of low melting eutectic compounds.*

**Key words:** eutectic structure, compositions diagram, state diagram, differential thermal method of physico-chemical analysis, heat store, heat transfer fluids, molten electrolytes for chemical current sources

**Для цитирования:**

Вердиев Н.Н., Омарова С.М., Алхасов А.Б., Магомедбеков У.Г., Гасангаджиева У.Г., Дворянчиков В.И. Система  $(LiF)_2 - (NaF)_2 - (NaCl)_2 - Na_3FSO_4$ . Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2017. Т. 60. Вып. 6. С. 77–82.

**For citation:**

Verdiev N.N., Omarova S.M., Alkhasov A.B., Magomedbekov U.G., Gasangadzhieva U.G., Dvoryanchikov V.I. System  $(LiF)_2 - (NaF)_2 - (NaCl)_2 - Na_3FSO_4$ . Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2017. V. 60. N 6. P. 77–82.

В работе приводятся результаты физико-химического анализа стабильного тетраэдра  $(LiF)_2 - (NaF)_2 - (NaCl)_2 - Na_3FSO_4$  четырехкомпонентной взаимной системы Li, Na // F, Cl, SO<sub>4</sub>, являющиеся частью систематических исследований, проводимых нами с целью выявления низкоплавких эвтектических составов многоцелевого назначения [1-3].

Выбор объекта исследований обоснован тем, что натриевые соли широко используются в целлюлозно-бумажной, текстильной, пищевой, строительной промышленности, а фторид лития – входит в состав флюсов, употребляемых при сварке цветных металлов и легких сплавов, используется при изготовлении призм, используемых в инфракрасной и ультрафиолетовой оптике [4].

Эвтектические составы на базе исследуемой системы могут быть использованы в качестве теплоносителей, теплоаккумуляторов в устройствах, аккумулирующих тепло, сохраняющих солнечную энергию и расплавленных электролитов химических источников тока [5, 6].

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

Исследования проводились дифференциально-термическим методом физико-химического анализа (ДТА). ДТА проводился на приборе синхронного термического анализа STA 449 F3 в атмосфере инертного газа (аргон). Исследования проводились в платиновых тиглях с использованием платина-платинородиевых термопар. Скорость нагревания и охлаждения образцов составляла 10 °С/мин. Точность измерения температур ±0,3 °С, масса

навесок 0,2 г. Индифферентное вещество – свежеприготовленный Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> квалификации «ч.д.а.». Квалификация исходных солей: LiF, NaF, NaCl – «о.с.ч.», Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – «ч.д.а.». Все составы выражены в эквивалентных процентах, а температуры – в градусах Цельсия.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Четырехкомпонентная взаимная система Li, Na // F, Cl, SO<sub>4</sub> характеризуется наличием одной дистектики (Na<sub>3</sub>FSO<sub>4</sub>) и двух перитектических соединений Li<sub>2</sub>Na<sub>4</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, LiNaSO<sub>4</sub>. В результате тетраэдрации системы без учета соединений инконгруэнтного плавления установлено, что ее диаграмма составов разбивается на четыре стабильных тетраэдра:  $(LiF)_2 - Li_2SO_4 - (NaCl)_2 - Na_3FSO_4$ ;  $Li_2SO_4 - Na_2SO_4 - (NaCl)_2 - Na_3FSO_4$ ;  $(LiF)_2 - (NaF)_2 - (NaCl)_2 - Na_3FSO_4$ ;  $(LiF)_2 - (LiCl)_2 - Li_2SO_4 - (NaCl)_2$ .

Для экспериментального исследования выбран тетраэдр  $(LiF)_2 - (NaF)_2 - (NaCl)_2 - Na_3FSO_4$ . Для удобства произведения расчетов объединены три тетраэдра (рис. 1).

*Огранивающие элементы тетраэдров*

1. LiF – NaF [7]. Эвтектика при 652 °С и 39 % NaF.
2. NaF – NaCl [8]. Эвтектика при 673 °С и 34,5 экв. % NaF.
3.  $(NaF)_2 - Na_2SO_4$  [8]. Эвтектики: e<sub>1</sub> при 747 °С и 17,5 экв. % NaF, e<sub>2</sub> при 779 °С и 44 экв. % NaF. В системе образуется соединение конгруэнтного плавления 784 °С и 35 экв. % NaF.
4.  $(NaCl)_2 - Na_2SO_4$  [8]. Эвтектика при 628 °С и 36 экв. % NaCl. Полиморфное превращение Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> при 736 °С.

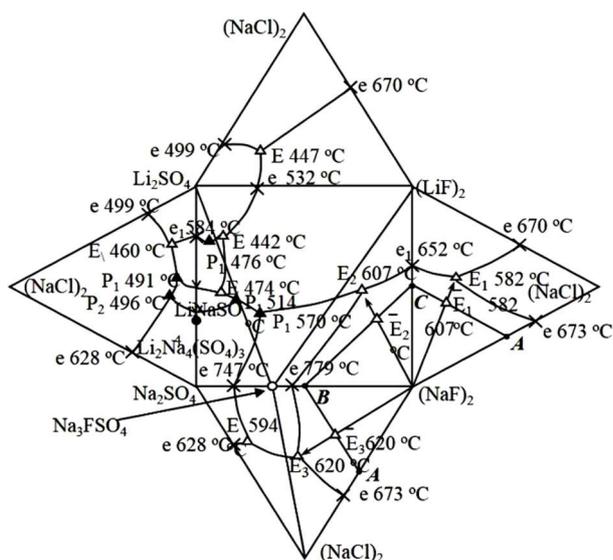


Рис. 1. Общая развертка граневых элементов стабильных тетраэдров:  $(\text{LiF})_2 - \text{Li}_2\text{SO}_4 - (\text{NaCl})_2 - \text{Na}_3\text{FSO}_4$ ;  $\text{Li}_2\text{SO}_4 - \text{Na}_2\text{SO}_4 - (\text{NaCl})_2 - \text{Na}_3\text{FSO}_4$ ;  $(\text{LiF})_2 - (\text{NaF})_2 - (\text{NaCl})_2 - \text{Na}_3\text{FSO}_4$  четырехкомпонентной взаимной системы Li, Na // F, Cl,  $\text{SO}_4$ , расположение двухмерного политермического сечения ABC и центральные проекции  $\bar{E}_1, \bar{E}_2, \bar{E}_3$  трехкомпонентных эвтектик  $E_1, E_2, E_3$  на стороны сечения ABC.

Fig. 1. The general scan of the facet elements of stable tetrahedra:  $(\text{LiF})_2 - \text{Li}_2\text{SO}_4 - (\text{NaCl})_2 - \text{Na}_3\text{FSO}_4$ ;  $\text{Li}_2\text{SO}_4 - \text{Na}_2\text{SO}_4 - (\text{NaCl})_2 - \text{Na}_3\text{FSO}_4$ ;  $(\text{LiF})_2 - (\text{NaF})_2 - (\text{NaCl})_2 - \text{Na}_3\text{FSO}_4$  quaternary reciprocal system Li, Na // F, Cl,  $\text{SO}_4$ , arrangement of two-dimensional sections of polythermal ABC and central projection  $\bar{E}_1, \bar{E}_2, \bar{E}_3$  of ternary eutectics  $E_1, E_2, E_3$  on the sides of ABC section

5.  $\text{LiF} - \text{NaCl}$  [9]. Диагональное сечение тройной взаимной системы Li, Na // F, Cl. Перевальная эвтектическая точка при 670 °C и 41,5 экв. % LiF.

6.  $\text{LiF} - \text{Na}_3\text{FSO}_4$  [10]. Адиагональное сечение обратимо-взаимной тройной системы Li, Na // F,  $\text{SO}_4$ . Эвтектика при 617 °C и 44 экв. % LiF.

7.  $\text{Li}_2\text{SO}_4 - (\text{NaCl})_2$  [9, 10]. Стабильная диагональ трехкомпонентной взаимной системы Li, Na // Cl,  $\text{SO}_4$ . Перевальная эвтектическая точка при 499 °C и 74 экв. %  $\text{Li}_2\text{SO}_4$ .

8.  $(\text{LiF})_2 - \text{Li}_2\text{SO}_4$  [8]. Эвтектика при 532 °C и 72,5 экв. % сульфата лития, лития излом при 806 °C и 9,3 %  $\text{Li}_2\text{SO}_4$ .

9.  $\text{Li}_2\text{SO}_4 - \text{Na}_2\text{SO}_4$  [7]. Эвтектика при 584 °C и 36,5 экв. %  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , Перитектики:  $p_1$  при 606 °C и 48 экв. %  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ;  $p_2$  при 636 °C и 62 экв. %  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

10. Na // F, Cl,  $\text{SO}_4$  [10]. Эвтектики:  $E_1$  при 594 °C и 64,14 экв. %  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , 7,69 экв. % NaF и 32,17 экв. % NaCl;  $E_2$  при 620 °C и 31,93 экв. %  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , 25,63 экв. % NaF и 42,44 экв. % NaCl.

11.  $\text{LiF} - \text{NaF} - \text{NaCl}$  [9]. Стабильный симплекс тройной взаимной системы Li, Na // F, Cl. Эвтектика при 582 °C и 40 экв. % LiF, 36 экв. % NaF и 24 экв. % NaCl.

12.  $\text{LiF} - \text{NaF} - \text{Na}_3\text{FSO}_4$  [9, 10]. Стабильный симплекс тройной взаимной системы Li, Na // F,  $\text{SO}_4$ . Эвтектика при 606 °C и 48 экв. % LiF, 28 экв. % NaF и 56 экв. %  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Проведенным теоретическим анализом граничных элементов системы Li, Na // F, Cl,  $\text{SO}_4$  установлено, что в тетраэдре  $\text{LiF} - \text{NaF} - \text{NaCl} - \text{Na}_3\text{FSO}_4$  реализуется эвтектический состав.

Для выявления концентраций исходных компонентов в эвтектике проведено планирование эксперимента в соответствии с правилами проекционно-термографического метода [11]. С этой целью в объеме кристаллизации фторида натрия выбрано двухмерное политермическое сечение ABC, где A – 50%  $(\text{NaF})_2 + 50\%$   $(\text{NaCl})_2$ ; B – 50%  $(\text{NaF})_2 + 50\%$   $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ; C – 50%  $(\text{NaF})_2 + 50\%$   $(\text{LiF})_2$  (рис. 1). На стороны сечения ABC нанесены центральные проекции трехкомпонентных эвтектик  $\bar{E}_1, \bar{E}_2, \bar{E}_3$  из вершины фторида натрия. Экспериментально ДТА изучен одномерный политермический разрез KL, где K – 50%  $(\text{NaF})_2 + 31\%$   $(\text{NaCl})_2 + 19\%$   $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , L – 50%  $(\text{NaF})_2 + 31\%$   $(\text{NaCl})_2 + 19\%$   $(\text{LiF})_2$  (рис. 2). T – x диаграмма разреза KL характеризуется двумя плавными кривыми первичной, вторичной кристаллизации и пересечением ветвей третичной кристаллизации с эвтектической прямой в точке a, показывающей постоянное соотношение фторида лития и соединения  $\text{Na}_3\text{FSO}_4$  (рис. 3). Эвтектический состав, кристаллизующийся при 543 °C и содержащий 23 экв. % NaF, 23,5 экв. % NaCl, 27,5 экв. %  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и 26 экв. % LiF, выявлен последовательным изучением политермических разрезов: A – a –  $\bar{E}^\square$ ;  $(\text{NaF})_2 - \bar{E}^\square - E^\square$  (рис. 2, 4).

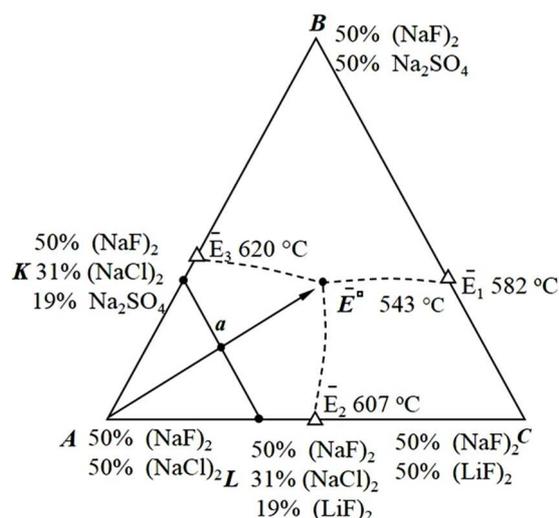


Рис. 2. Расположение разрезов KL, A – a – E на двухмерном политермическом сечении ABC и центральные проекции трехкомпонентных эвтектик  $\bar{E}_1, \bar{E}_2, \bar{E}_3$

Fig. 2. The location of the sections KL, A – a – E on the two-dimensional polythermal section of the ABC and central projection of three-component eutectics  $\bar{E}_1, \bar{E}_2, \bar{E}_3$

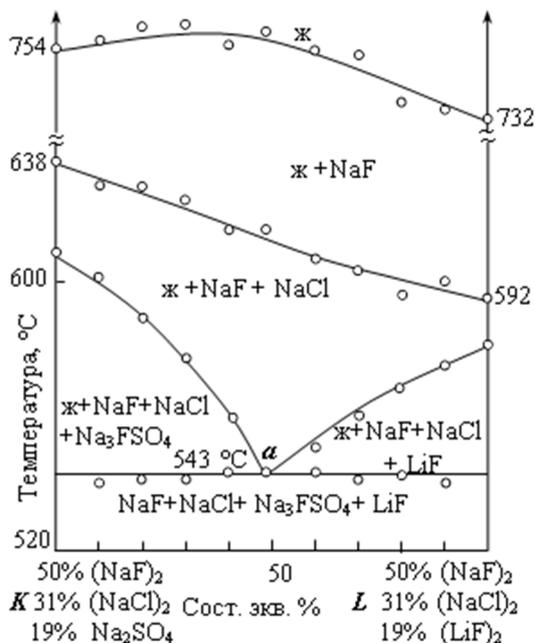


Рис. 3. Т – х диаграмма системы  $(\text{LiF})_2 - (\text{NaF})_2 - (\text{NaCl})_2 - \text{Na}_3\text{FSO}_4$  в политермическом разрезе KL  
 Fig. 3. T – x diagram of the system  $(\text{LiF})_2 - (\text{NaF})_2 - (\text{NaCl})_2 - \text{Na}_3\text{FSO}_4$  in polythermal section KL

ВЫВОДЫ

После предварительного теоретического анализа элементов ограничения и планирования этапов исследования проведены экспериментальные исследования методом ДТА по выявлению фазовых равновесных состояний в стабильном тетраэдре  $(\text{LiF})_2 - \text{Li}_2\text{SO}_4 - (\text{NaCl})_2 - \text{Na}_3\text{FSO}_4$  четырехкомпонентной взаимной системы Li, Na // F, Cl,  $\text{SO}_4$ . В результате установлено, что в системе реализуется эвтектический состав, кристаллизующийся при 543 °С. Наличие точки совместной кристаллизации четырех фаз (эвтектика) и содержание в ней исходных ингредиентов установлено исследованием Т-х диаграмм серии политермических разрезов (рис. 2–4).

ЛИТЕРАТУРА

1. Вердиев Н.Н., Омарова С.М., Алхасов А.Б., Магомедбеков У.Г., Арбуханова П.А., Искендеров Э.Г. Система  $\text{LiF} - \text{Li}_2\text{SO}_4 - \text{NaCl}$ . Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2016. Т. 59. Вып. 11. С. 46-49.
2. Омарова С.М., Вердиев Н.Н., Алхасов А.Б., Магомедбеков У.Г., Дворянчиков В.И., Некрасов Д.А. Стабильный тетраэдр  $\text{LiF}-\text{LiCl}-\text{Li}_2\text{SO}_4-\text{NaCl}$ . Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2017. Т. 60. Вып. 5. С. 57-62.
3. Вердиев Н.Н., Арбуханова П.А., Вердиева З.Н., Омарова З.М., Магомедбеков У.Г. Галогенидно-сульфатные смеси щелочных металлов как теплонакопители. Материалы IV Межд. конф. Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы. Махачкала. 2015. С. 167–172.
4. Полуэктов Н.С., Мешкова С.Б., Полуэктов Е.Н. Аналитическая химия лития. М.: Наука. 1975. 203 с.

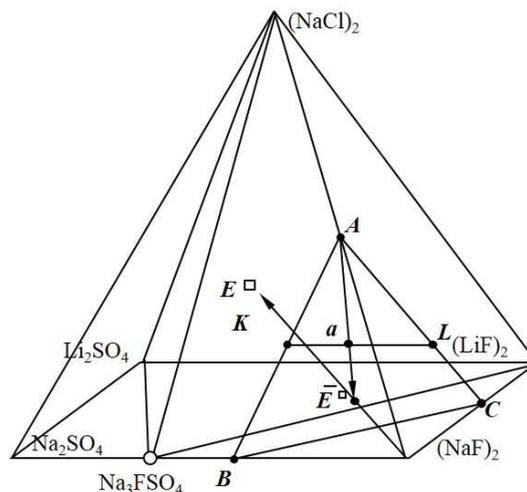


Рис. 4. Диаграмма составов стабильных тетраэдров:  $(\text{LiF})_2 - \text{Li}_2\text{SO}_4 - (\text{NaCl})_2 - \text{Na}_3\text{FSO}_4$ ;  $\text{Li}_2\text{SO}_4 - \text{Na}_2\text{SO}_4 - (\text{NaCl})_2 - \text{Na}_3\text{FSO}_4$ ;  $(\text{LiF})_2 - (\text{NaF})_2 - (\text{NaCl})_2 - \text{Na}_3\text{FSO}_4$  и расположение политермических разрезов: ABC; KL; A – a –  $\bar{E}$ ;  $(\text{NaF})_2 - \bar{E} - E$   
 Fig. 4. Compositions diagram of stable tetrahedra:  $(\text{LiF})_2 - \text{Li}_2\text{SO}_4 - (\text{NaCl})_2 - \text{Na}_3\text{FSO}_4$ ;  $\text{Li}_2\text{SO}_4 - \text{Na}_2\text{SO}_4 - (\text{NaCl})_2 - \text{Na}_3\text{FSO}_4$ ;  $(\text{LiF})_2 - (\text{NaF})_2 - (\text{NaCl})_2 - \text{Na}_3\text{FSO}_4$  and location of polythermal cuts: ABC; KL; A – a –  $\bar{E}$ ; and  $(\text{NaF})_2 - \bar{E} - E$

Наименьшая точка совместной кристаллизации трех фаз в ограняющих трехкомпонентных системах исследуемого тетраэдра соответствует 582 °С, а температура плавления четверной эвтектики 543 °С, т.е. понизилась на 39 °С, что значительно сокращает энергозатраты, необходимые для плавления смеси. Также в состав эвтектики входят литиевые соли, обладающие большими значениями энтальпий фазовых переходов, следовательно, можно предположить, что и эвтектический состав будет обладать достаточным значением  $\Delta_m H$ , чтобы использовать в качестве теплонакопителя в устройствах, аккумулирующих солнечную энергию.

REFERENCES

1. Verdiev N.N., Omarova S.M., Alkhasov A.B., Magomedbekov U.G., Arbukhanova P.A., Iskenderov E.G. System  $\text{LiF} - \text{Li}_2\text{SO}_4 - \text{NaCl}$ . Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2016. V. 59. N 11. P. 46-49 (in Russian).
2. Omarova S.M., Verdiev N.N., Alkhasov A.B., Magomedbekov U.G., Dvoryanchikov V.I., Nekrasov D.A. Regular tetrahedron  $\text{LiF}-\text{LiCl}-\text{Li}_2\text{SO}_4-\text{NaCl}$ . Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2017. V. 60. N 5. P. 57-62 (in Russian).
3. Verdiev N.N., Arbukhanova P.A., Verdieva Z.N., Omarova Z.M., Magomedbekov U.G. Galogenidno-sulfatnye of mix of alkaline metals as heatstores. Materials of IV Mezhd. Conf. Renewable power: problems and prospects. Makhachkala. 2015. P. 167–172 (in Russian).

5. **Гаркушин И.К., Губанова Т.В., Фролов Е.И., Дворянова Е.М., Истомова М.А., Гаркушин А.И.** Функциональные материалы на основе многокомпонентных солевых систем. *Журн. неорганической химии*. 2015. Т. 60. № 3. С. 374–391.
6. **Радзиховская М. А., Гаркушин И. К., Данилушкина Е.Г., Штеренберг А.М.** Патент РФ № 2506669. 2012.
7. Диаграммы плавкости солевых систем: справочник. Под ред. В.И. Посыпайко и Е.А. Алексеевой. Ч. II. Двойные системы с общим анионом. М.: Metallurgiya. 1977. 303 с.
8. **Посыпайко В.И., Алексеева Е.А., Васина Н.А.** Диаграммы плавкости солевых систем: справочник. Ч. III. Двойные системы с общим катионом. М.: Metallurgiya. 1977. 208 с.
9. Диаграммы плавкости солевых систем: справочник (тройные взаимные системы). Под ред. В.И. Посыпайко, Е.А. Алексеевой. М.: Химия. 1977. 392 с.
10. Справочник по плавкости систем из безводных неорганических солей. Под ред. Н. К. Воскресенской. Т.2. Системы тройные и более сложные. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1961. 585 с.
11. **Космынин А.С., Трунин А.С.** Оптимизация экспериментального исследования гетерогенных многокомпонентных систем. Тр. Самарской школы по физико-химическому анализу многокомпонентных систем. Самара: СамГТУ. 2007. Т. 14. 160 с.
4. **Poluektov N.S., Meshkova S.B., Poluektov E.N.** Analytical chemistry of lithium. M.: Nauka. 1975. 203 p. (in Russian).
5. **Garkushin I.K., Gubanov T.V., Frolov E.I., Dvoryanova E.M., Istomova M.A., Garkushin A.I.** The functional materials on the basis of multicomponent salt systems. *Zhurn. Neorg. Khim.* 2015. V.60. N 3. P. 374–391 (in Russian).
6. **Radzikhovskiy M.A., Garkushin I.K., Danilushkin E.G., Shterenberg A.M.** RF Patent № 2506669. 2012 (in Russian).
7. Diagrams of fusibility of the salt systems: Reference book. Ed. V.I. Posypayko and E.A. Alekseeva. Ch. II. Double systems with a general anion. M.: Metallurgiya. 1977. 303 p (in Russian).
8. **Posypayko V.I., Alekseeva E.A., Vasina N.A.** Diagrams of fusibility of the salt systems: Reference book. Ch. III. Double systems with general cation. M.: Metallurgiya. 1977. 208 p. (in Russian).
9. The diagrams fusibility of salt systems: Handbook of (triple mutual systems). Ed. V.I. Posypayko, E.A. Alekseeva. M: Chemistry. 1977. 392 p.
10. Handbook of fusibility of systems of anhydrous inorganic salts. Ed. by. N. K. Voskresensky. V. 2. Triple and more complex. M.-L.: Izd-vo Academy of Sciences of the USSR. 1961. 585 p. (in Russian).
11. **Kosmynin A.S., Trunin A.S.** Optimization of experimental investigation of heterogeneous multi-component systems. Tr. The Samara school of physical-chemical analysis of multicomponent systems. Samara: SamGTU. 2007. V. 14. 160 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 28.12.2016  
Принята к опубликованию 23.05.2017*

*Received 28.12.2016  
Accepted 23.05.2017*