

УДК 544.016.2:544.344

ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ В СТАБИЛЬНОМ ТЕТРАЭДРЕ $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$

Дибиров Я.А.

*Филиал ФГБУН «Объединенный институт высоких температур» РАН, Махачкала,
e-mail: jakhya@yandex.ru*

Дифференциально-термическим методом физико-химического анализа исследован стабильный тетраэдр $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$, являющийся стабильным элементом четырехкомпонентной взаимной системы $\text{Ca, Li // MoO}_4, \text{SO}_4, \text{Cl}$. Основанием исследуемого тетраэдра является тройная система из литиевых солей – $\text{Li // MoO}_4, \text{SO}_4, \text{Cl}$, а вершиной – молибдат кальция. Боковые грани тетраэдра образованы следующими тройными системами: стабильным секущим треугольником $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$ призмы составов четырехкомпонентной взаимной системы $\text{Ca, Li // MoO}_4, \text{SO}_4, \text{Cl}$, стабильным треугольником $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-LiCl}$ квадрата составов трехкомпонентной взаимной системы $\text{Ca, Li // MoO}_4, \text{Cl}$ и стабильным треугольником $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4$ квадрата составов трехкомпонентной взаимной системы $\text{Ca, Li // MoO}_4, \text{SO}_4$. Все двойные и тройные системы ограничения тетраэдра исследованы ранее и являются системами эвтектического типа. Планирование эксперимента для получения параметров четверной эвтектики проведено согласно общим правилам проекционно-термографического метода, для чего в объеме кристаллизации вершины тетраэдра выбрано двухмерное сечение, параллельное основанию $\text{Li // MoO}_4, \text{SO}_4, \text{Cl}$. Экспериментальным изучением политермического разреза на этом сечении выявлены направления на проекцию четверной эвтектики с двух вершин и получен ее состав. Состав и температура плавления четверной эвтектики исследуемого тетраэдра получены экспериментальным исследованием лучевого разреза, исходящего из вершины молибдата кальция и проходящего через проекцию четверной эвтектики на двухмерном сечении. Проведенными calorиметрическими исследованиями получены значения энтальпии и энтропии плавления четверного неинвариантного состава стабильного тетраэдра $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$.

Ключевые слова: стабильный тетраэдр, эвтектика, диаграмма состояния, энтальпия плавления, энтропия плавления

PHASE BALANCES IN THE STABLE TETRAHEDRON $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$

Dibirov Ya.A.

Branch FGBUN Joint institute of high temperatures RAN, Makhachkala, e-mail: jakhya@yandex.ru

The differential and thermal method of the physical and chemical analysis investigated the stable tetrahedron of $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$ which is a stable element of the four-component mutual system $\text{Ca, Li // MoO}_4, \text{SO}_4, \text{Cl}$. The basis of the studied tetrahedron is the threefold system from lithium salts – $\text{Li // MoO}_4, \text{SO}_4, \text{Cl}$, and top – calcium molybdate. Side sides of a tetrahedron are formed by the following threefold systems: to stable secants triangle of $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$ of a prism of structures of the four-component mutual system $\text{Ca, Li // MoO}_4, \text{SO}_4, \text{Cl}$, stable triangle of $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-LiCl}$ of a square of structures of the three-component mutual system $\text{Ca, Li // MoO}_4, \text{Cl}$ and stable triangle of $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4$ of a square of structures of the three-component mutual system $\text{Ca, Li // MoO}_4, \text{SO}_4$. All double and threefold systems of an sides of a tetrahedron are investigated earlier and are the systems of the eutectic type. Planning of an experiment for obtaining parameters of a fourfold eutectic is carried out according to the general rules of a projective thermographic method for what in volume of crystallization of top of a tetrahedron the two-dimensional section parallel the basis of $\text{Li // MoO}_4, \text{SO}_4, \text{Cl}$ is chosen. Experimental studying of a polythermal section on this section revealed the directions on a projection of a fourfold eutectic from two tops and its structure is received. Structure and temperature of melting of a fourfold eutectic of the studied tetrahedron are received by a pilot study of the beam section which is proceeding from top of molybdate of calcium and passing through a projection of a fourfold eutectic on two-dimensional section. Values of an enthalpy and entropy of melting of fourfold invariant structure of a stable tetrahedron of $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$ are received by the conducted calorimetric researches.

Keywords: stable tetrahedron, eutectic, chart of a state, melting enthalpy, entropy of melting

С каждым годом в науке, технике и различных отраслях промышленности все большее распространение получают ионные расплавы солей и их эвтектические составы. Перспективным и востребованным направлением применения низкоплавких солевых композитов в настоящее время является их использование в качестве рабочих тел и теплоносителей в тепловых аккумуляторах, проводников второго рода в источниках постоянного тока, при синтезе различных химических соединений и др. [1]. Объектом исследования является

стабильный тетраэдр $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$, основанием которого является тройная система из литиевых солей, а вершиной – молибдат кальция. Исходные соли – компоненты тетраэдра плавятся в широком температурном диапазоне и характеризуются высокими значениями энтальпий плавления.

Цель исследования: выявление фазовых равновесий в стабильном тетраэдре $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$ и поиск низкоплавкого четверного неинвариантного состава.

Формирование базы данных

В элементы ограничения стабильного тетраэдра $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$ (рис. 1, 2) входят шесть двухкомпонентных:

1. $\text{Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$ [2]. Эвтектика (e_1) при 478°C и содержит 36,5 мол. % Li_2SO_4 .

2. $\text{Li}_2\text{MoO}_4\text{-LiCl}$ [2]. Эвтектика при (e_2) 495°C и содержит 26,6 мол. % Li_2MoO_4 .

3. $\text{Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4$ [2]. Эвтектика (e_3) при 564°C и содержит 62,5 мол. % Li_2SO_4 .

4. $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4$ [2]. Эвтектика (e_4) при 688°C и содержит 97 мол. % Li_2MoO_4 .

5. $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4$ (стабильная диагональ квадрата составов трехкомпонентной взаимной системы $\text{Ca,Li//MoO}_4,\text{SO}_4$) [3, 4]. Эвтектика (e_5) при 708°C и содержит 11,0 мол. % CaMoO_4 .

6. $\text{CaMoO}_4\text{-LiCl}$ (стабильная диагональ квадрата составов трехкомпонентной взаимной системы $\text{Ca,Li//MoO}_4,\text{Cl}$) [5]. Эвтектика (e_6) при 586°C и содержит 4,7 мол. % CaMoO_4 .

и четыре трехкомпонентные системы:

1. $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$ (стабильный секущий треугольник призмы составов системы $\text{Ca,Li // MoO}_4, \text{SO}_4, \text{Cl}$) [6, 7]. Эвтектика (E_1^Δ) 468°C и содержит 3,4 мол. % CaMoO_4 , 34,8 мол. % Li_2SO_4 , 61,8 мол. % LiCl .

2. $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-LiCl}$ (стабильный треугольник квадрата составов трехкомпонентной взаимной системы $\text{Ca,Li // MoO}_4, \text{Cl}$) [5]. Эвтектика (E_2^Δ) при 487°C и содержит 1,0 мол. % CaMoO_4 , 26,8 мол. % Li_2MoO_4 , 72,2 мол. % LiCl .

3. $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4$ (стабильный треугольник квадрата составов трехкомпонентной взаимной системы $\text{Ca,Li // MoO}_4, \text{SO}_4$) [3, 4]. Эвтектика (E_3^Δ) 538°C и содержит 3,5 мол. % CaMoO_4 , 36,7 мол. % Li_2MoO_4 , 59,8 мол. % Li_2SO_4 .

4. $\text{Li // MoO}_4, \text{SO}_4, \text{Cl}$ [8]. Эвтектика (E_4^Δ) при 445°C и содержит 17,9 мол. % Li_2MoO_4 , 23,6 мол. % Li_2SO_4 , 58,5 мол. % LiCl .

Развертка стабильного тетраэдра $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$ с нанесением всей информации о граневых элементах приведена на рис. 2.

Материалы и методы исследования

Экспериментальное исследование разрезов системы $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$ проведено с применением дифференциально-термического метода анализа (ДТА) [9–11] со следующим приборным исполнением. Записи термограмм осуществлялись на самописце следящего уравнивания КСП-4 с применением платинородий-платиновых термопар. Для

усиления сигнала с дифференциальной термопары использовали фотоусилитель Ф-116/1. Для регулирования чувствительности сигнала на дифференциальной термопаре использовали магазин сопротивлений МСР-63, а при необходимости смещение положения записи дифференциальной термограммы производилось использованием источника регулируемого напряжения ИРН 64. Скорость нагрева (охлаждения) регулировали автотрансформатором ЛАТР-2М.

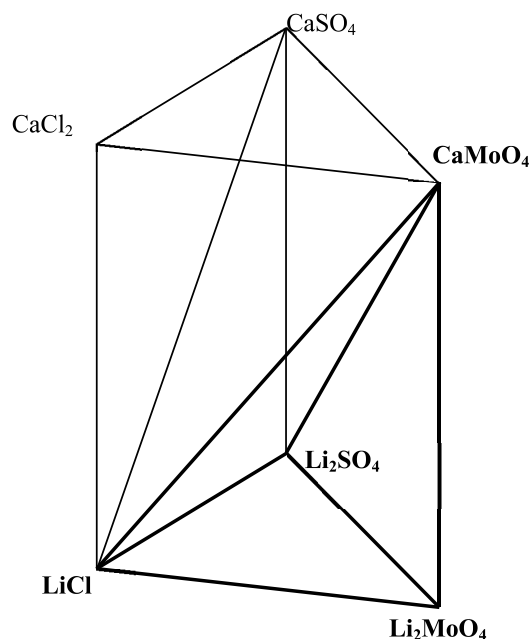


Рис. 1. Призма составов системы $\text{Ca,Li // MoO}_4, \text{SO}_4, \text{Cl}$ с указанием расположения стабильного тетраэдра $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$

Предварительно обезвоженные исходные соли имели квалификации Li_2MoO_4 и Li_2SO_4 – «хч», а CaMoO_4 и LiCl – «ч». Эталонным веществом служил свежeproкаленный оксид алюминия квалификации «чда». Все исследования проводили в инертной среде в стандартных платиновых микротиглях. Масса навесок 0,3 г. Точность измерения температур $\pm 2,5^\circ\text{C}$. Выбор политермических сечений для экспериментального изучения проводился согласно общим правилам проекционно-термографического метода [12].

Для calorиметрических исследований образцов [13–15] использовали дифференциально-сканирующий calorиметр NETZSCH DSC 204 F1 со скоростью сканирования в $0,5\text{--}20\text{ K/мин}$. Точность измерения температуры при этом составляла $\pm 0,2^\circ\text{C}$, а теплоты – $\pm 2\%$.

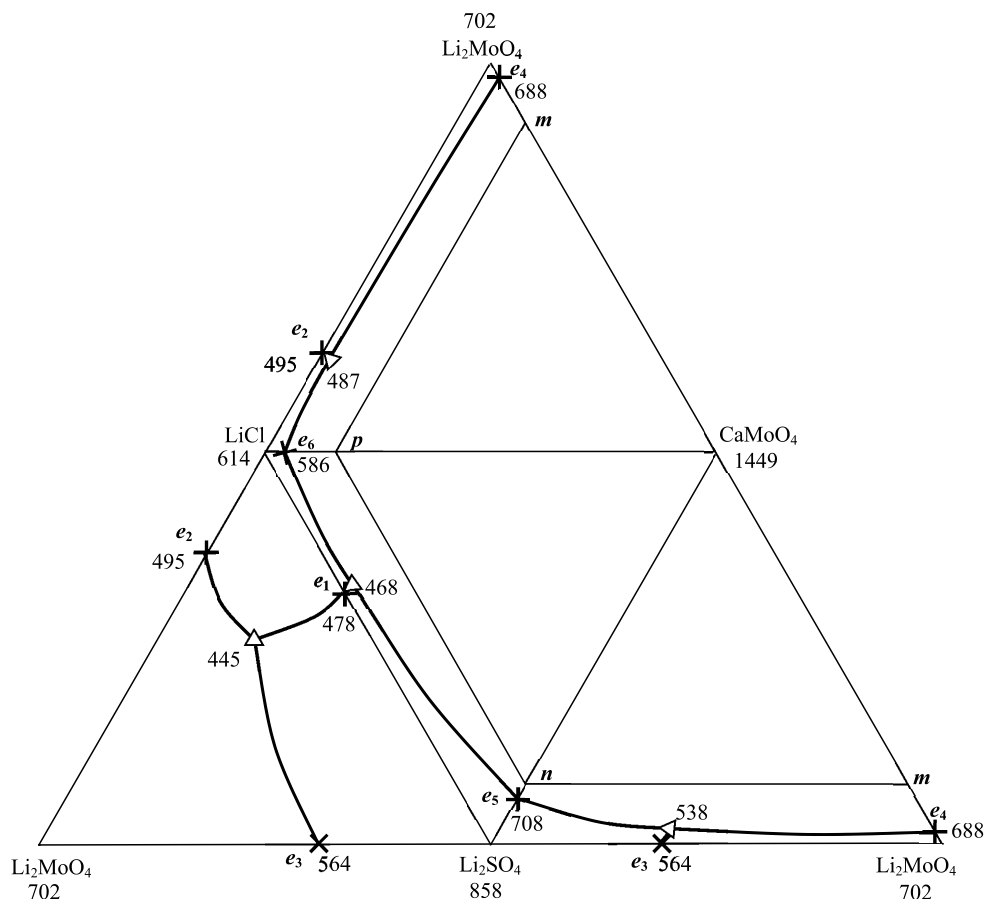


Рис. 2. Развертка граневых элементов тетраэдра $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$ и расположение двухмерного сечения $m\text{-n-p}$

Результаты исследования и их обсуждение

Исследуемый тетраэдр $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$ является стабильным элементом ограничения четверной взаимной системы $\text{Ca, Li // MoO}_4, \text{SO}_4, \text{Cl}$. Из проведенного литературного обзора, в результате которого сформирована база данных, следует, что все элементы ограничения исследуемого стабильного тетраэдра были исследованы ранее. Исследованиями, проведенными в данной работе, определены состав и температура плавления четверной эвтектики стабильного тетраэдра $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$.

Согласно правилам проекционно-термографического метода, для определения параметров четверной эвтектики в объеме кристаллизации молибдата кальция выбрано двухмерное политемическое сечение $m\text{-n-p}$, параллельное тройной системе ограничения $\text{Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$ (рис. 2, 3),

где m – (15% CaMoO_4 + 85% Li_2MoO_4), n – (15% CaMoO_4 + 85% Li_2SO_4) и p – (15% CaMoO_4 + 85% LiCl).

Проецирование тройной эвтектической точки каждой из боковых граней тетраэдра составов (E_1^A , E_2^A и E_3^A) на соответствующую сторону двухмерного сечения $m\text{-n-p}$ (соответственно \bar{E}_1^A , \bar{E}_2^A и \bar{E}_3^A) произведено геометрически. Для этого из вершины тетраэдра составов проведен отрезок прямой, соединяющий полюс молибдата кальция с точкой состава тройной эвтектики на каждой боковой грани. Точка пересечения этой линии со стороной двухмерного сечения на этой грани и есть проекция тройной эвтектической точки на соответствующей стороне выбранного сечения с полюса молибдата кальция. После получения проекций каждой из тройных эвтектических точек на соответствующей стороне сечения $m\text{-n-p}$ (\bar{E}_1^A , \bar{E}_2^A и \bar{E}_3^A) для проведения экспериментальных исследований выбран одномерный

политермический разрез $q-s$ (q – (15% CaMoO_4 + 65% Li_2MoO_4 + 20% LiCl), s – (15% CaMoO_4 + 65% Li_2SO_4 + 20% LiCl)), параллельный стороне $m-n$ двухмерного сечения $m-n-p$ (рис. 3).

Диаграмма состояния, полученная экспериментальным изучением разреза $q-s$, приведена на рис. 4. По точкам 1 и 2, полученным как точки пересечения ветвей третичной и четвертичной кристаллизаций диаграммы состояния разреза $q-s$, выявлены направления на проекцию четверной эвтектической точки с вершин m и n . Состав проекции четверной эвтектики (\bar{E}^{\blacksquare}) на сечении $m-n-p$ получен геометрическим построением, как точка пересечения лучевых разрезов $m \rightarrow 1 \rightarrow \bar{E}^{\blacksquare}$ и $n \rightarrow 2 \rightarrow \bar{E}^{\blacksquare}$ (рис. 3, 4). По полученному составу про-

екции четверной эвтектики (\bar{E}^{\blacksquare}) определены соотношения компонентов молибдата, сульфата и хлорида лития в составе четверной эвтектики.

По диаграмме состояния (рис. 5), полученной экспериментальным изучением лучевого разреза $\text{CaMoO}_4 \rightarrow \bar{E}^{\blacksquare} \rightarrow \bar{E}^{\blacksquare}$, исходящего из вершины CaMoO_4 и проходящего через точку проекции четверной эвтектики (\bar{E}^{\blacksquare}) на сечении $m-n-p$ (рис. 3), определены состав и температура плавления четверной эвтектики исследуемого тетраэдра (\bar{E}^{\blacksquare}). Отличительным свойством этого разреза является постепенное уменьшение концентрации CaMoO_4 без изменения полученных в составе проекции четверной эвтектики (\bar{E}^{\blacksquare}) соотношений концентраций Li_2MoO_4 , Li_2SO_4 и LiCl .

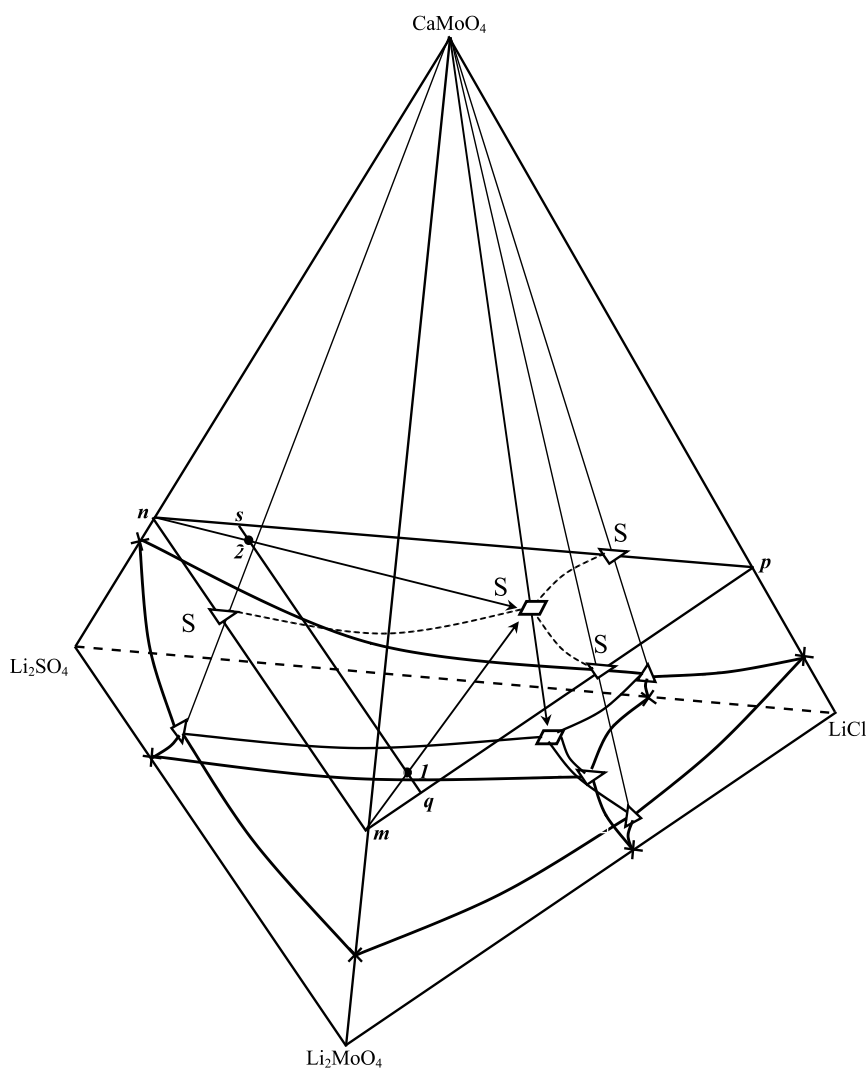


Рис. 3. Схематическое расположение объемов кристаллизации в тетраэдре составов $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$ с указанием геометрических построений для определения состава четверной эвтектики

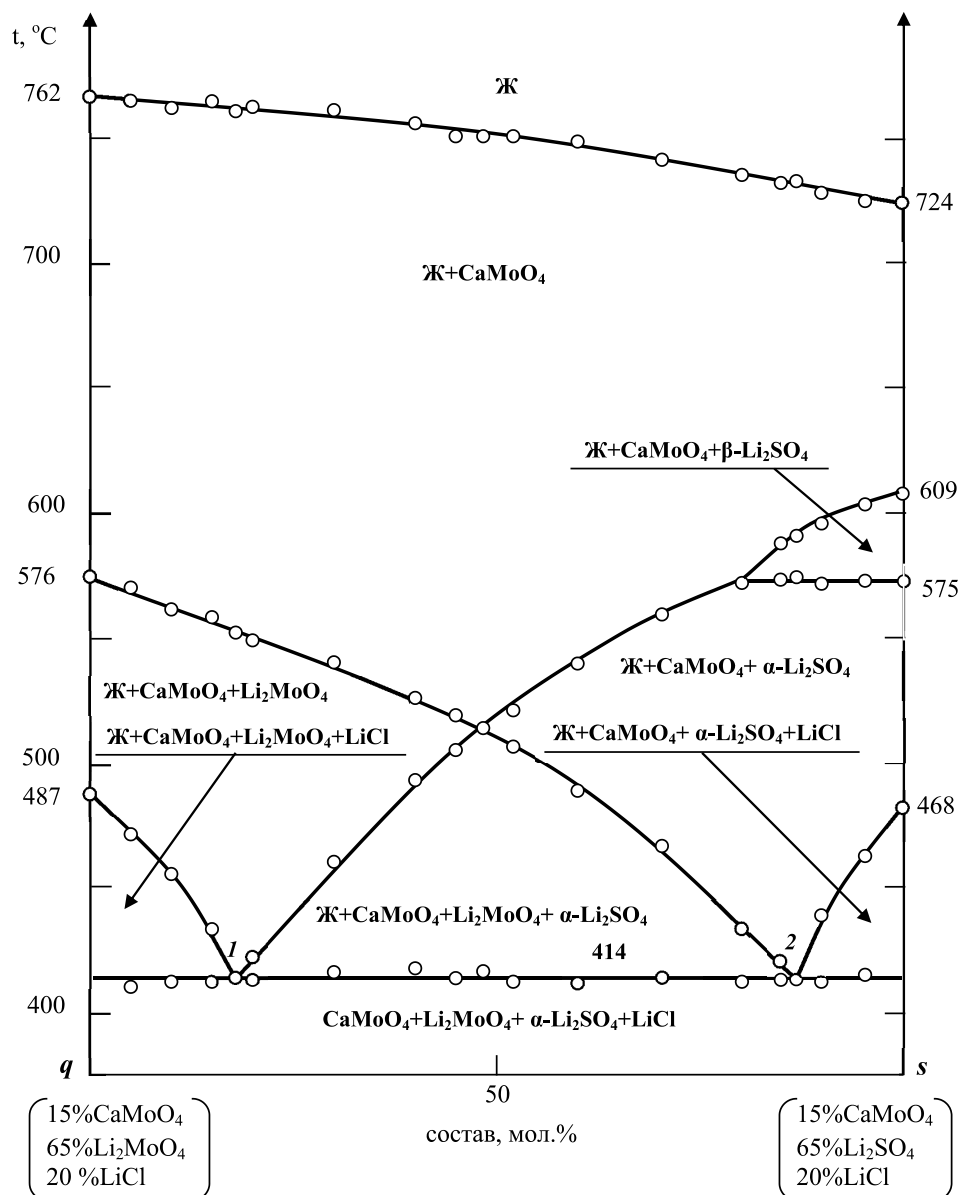


Рис. 4. Диаграмма состояния политермического разреза q-s

Энтальпия плавления образца эвтектического состава четверной эвтектики, содержащего (в мол.%) 2,0% CaMoO_4 , 20,7% Li_2MoO_4 , 25,0% Li_2SO_4 и 52,3% LiCl , определена на дифференциально-сканирующем калориметре NETZSCH DSC 204 F1 и составила $405 \pm 8,1$ кДж/кг. Энтропия плавления четверной эвтектики составляет $589 \pm 11,8$ Дж/(кг·К).

Четверной эвтектике (E^*) соответствует невариантный процесс:



Выводы

Проведенными исследованиями выявлены фазовые равновесия, состав и температура плавления четверной эвтектики стабильного тетраэдра $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$, плавящейся при температуре 414 $^\circ\text{C}$ с удельной энтальпией плавления $405 \pm 8,1$ кДж/кг.

Установлены объемы кристаллизации каждого компонента системы в тетраэдре составов $\text{CaMoO}_4\text{-Li}_2\text{MoO}_4\text{-Li}_2\text{SO}_4\text{-LiCl}$.

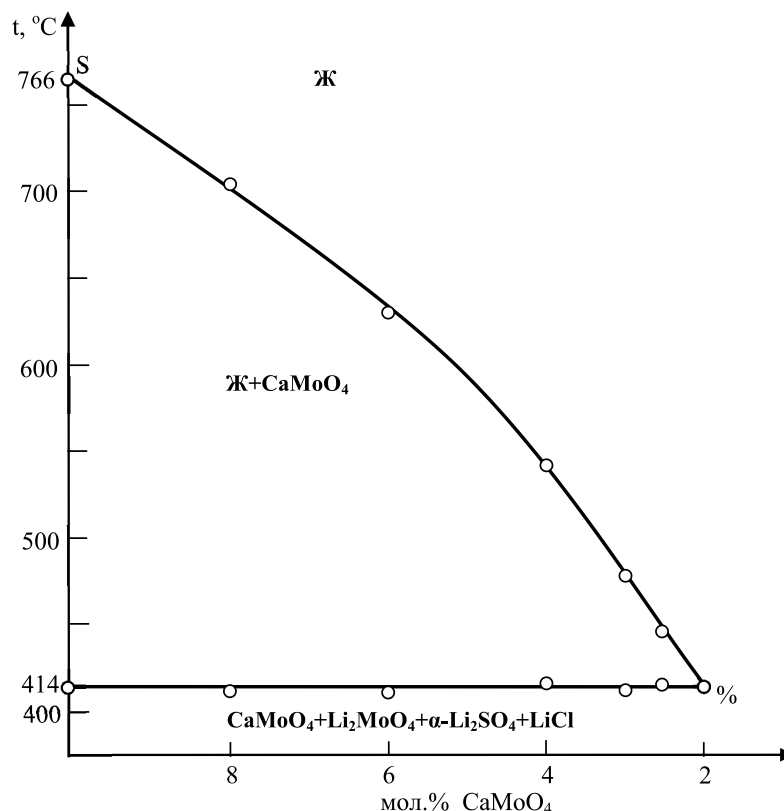


Рис. 5. Диаграмма состояния лучевого разреза $\text{CaMoO}_4 \rightarrow \bar{E}^{\square} \rightarrow \bar{E}^{\square}$

Полученный эвтектический состав с достаточно высоким значением энтальпии плавления может быть использован в качестве рабочего тела в тепловых аккумуляторах.

Список литературы / References

1. Гасаналиев А.М., Гаркушин И.К., Дибиров М.А., Трунин А.С. Применение расплавов в современной науке и технике. Махачкала: Деловой мир, 2011. 159 с.

Gasanaliev A.M., Garkushin I.K., Dibirov M.A., Trunin A.S. Use of fusions in modern science and technology. Makhachkala: Delovoi mir, 2011. 159 p. (in Russian).

2. Справочник по плавкости систем из безводных неорганических солей. Двойные системы / Под общ. ред. Н.К. Воскресенской. М.: АН СССР, 1961. 845 с.

The reference book on fusibility of systems from waterless inorganic salts. Double systems / Under the general editorial office N.K. Voskresenskoy. M.: AN SSSR, 1961. 845 p. (in Russian).

3. Вердиев Н.Н., Дибиров Я.А., Арбуханова П.А., Вайнштейн С.И. Трехкомпонентная взаимная система $\text{Li,Ca//SO}_3,\text{MoO}_4$ // Вестник МГУ. Серия 2. Химия. 2009. № 2. С. 139–144.

Verdiev N.N., Dibirov Ya.A., Arbukhanova P.A., Vaynshteyn S.I. Three-component mutual system $\text{Li,Ca//SO}_3,\text{MoO}_4$ // Vestnik MGU. Seriya 2. Khimiya. 2009. № 2. P. 139–144 (in Russian).

4. Дибиров Я.А. Теплоаккумулирующие составы на основе системы $\text{Li,Ca//SO}_3,\text{MoO}_4$ // Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов: материалы IV Школы молодых ученых им. Э.Э. Шпилеррайна (г. Махачкала, 19–23

сентября 2011 г.). Махачкала: АЛЕФ (ИП Овчинников), 2011. С. 118–122.

Dibirov Ya.A. Heat-retaining structures on the basis of the system $\text{Li,Ca//SO}_3,\text{MoO}_4$ // Aktualnye problemy osvoeniya vobnovlyаемых energoresurov: materialy IV Shkoly molodykh uchenykh im. E.E. Shpilrayna (g. Makhachkala, 19–23 sentyabrya 2011 g.). Makhachkala: ALEF (IP Ovchinnikov), P. 118–122 (in Russian).

5. Гасаналиев А.М., Трунин А.С., Дибиров М.А. Диаграмма плавкости системы Li,Ca//Cl,MoO_4 // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 1981. № 2. С. 194–196.

Gasanaliev A.M., Trunin A.S., Dibirov M.A. Chart of fusibility of system Li,Ca//Cl,MoO_4 // Izv. vuzov. Chemistry and chemical technology. 1981. № 2. P. 194–196 (in Russian).

6. Дибиров Я.А., Вердиев Н.Н., Арбуханова П.А., Беренгартен М.Г., Дибиров К.Я. Фазовые равновесия и теплоаккумулирующие материалы в системе $\text{LiCl-Li}_2\text{SO}_4\text{-CaMoO}_4$ // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2012. № 8. С. 50–52.

Dibirov Ya.A., Verdiev N.N., Arbuxanova P.A., Berengarten M.G. Phase balances and heat-retaining materials in system $\text{LiCl-Li}_2\text{SO}_4\text{-CaMoO}_4$ // Izvestia vuzov. Chemistry and chemical technology. 2012. № 8. P. 50–52 (in Russian).

7. Дибиров Я.А. Фазовые равновесия в системе $\text{LiCl-Li}_2\text{SO}_4\text{-CaMoO}_4$ // Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах (ФАГРАН – 2018): материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием (г. Воронеж, 8–11 октября 2018 г.). Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2018. С. 408–409.

Dibirov Ya.A. Phase equilibria in the $\text{LiCl-Li}_2\text{SO}_4\text{-CaMoO}_4$ system // Fiziko-khimicheskie processy v kondensirovannykh sredakh i na mezhfaznykh granicax (FAGRAN – 2018): materialy

VIII Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem (g. Voronezh, 8–11 oktyabrya 2018 g.). Voronezh: Izdatelsko-poligraficheskij centr «Nauchnaya kniga», 2018. P. 408–409 (in Russian).

8. Губанова Т.В. Фазовые равновесия в шестикомпонентной системе Li//F,Cl,VO₃,SO₄,CrO₄,MoO₄ и элементах ее ограничения: дис. ... канд. хим. наук. Самара, 2003. 126 с.

Gubanova T.V. Phase balances in six-component system Li//F,Cl,VO₃,SO₄,CrO₄,MoO₄ and elements of its sides: dis. ... kand. khim. nauk. Samara, 2003. 126 p. (in Russian).

9. Трунин А.С., Мешалкин А.В. Дифференциальный термический анализ. Самара: Самар. гос. обл. академия Научной, 2010. 32 с.

Trunin A.S., Meshalkin A.V. Differential thermal analysis. Samara: Samar. gos. obl. akademiya Nayanovoy, 2010. 32 p. (in Russian).

10. Егунов В.П. Термический анализ с эталоном или без него // Международная конференция по термическому анализу и калориметрии в России (RTAC-2013): материалы XIV Международной конференции (г. Санкт-Петербург, 23–28 сентября 2013 г.). Санкт-Петербург: Издательский дом Руда и Металлы, 2013. С. 388–391.

Egunov V.G. Thermal analysis with or without reference // Mezhdunarodnaya konferenciya po termicheskomu analizu i kalorimetrii v Rossii (RTAC-2013): materialy XIV Mezhdunarodnoj konferencii (g. Sankt-Peterburg 23–28 sentyabrya 2013 g.). Sankt-Peterburg: Izdatelskij dom Ruda i Metally, 2013. P. 388–391.

dunarodnoj konferencii (g. Sankt-Peterburg 23–28 sentyabrya 2013 g.). Sankt-Peterburg: Izdatelskij dom Ruda i Metally, 2013. P. 388–391 (in Russian).

11. Ивлев В.И., Фомин Н.Е., Юдин В.А. и др. Методы термического анализа. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2017. 44 с.

Ivlev V.I., Fomin N.E., Yudin V.A. and others. Thermal analysis methods. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2017. 44 p. (in Russian).

12. Космынин А.С., Трунин А.С. Проекционно-термографический метод исследования гетерогенных равновесий в конденсированных многокомпонентных системах. Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2006. 182 с.

Kosminin A.S., Trunin A.S. Projective and thermographic method of a research of heterogeneous balances in the condensed multicomponent systems. Samara: Samarskij gos. techn. un-t, 2006. 182 p. (in Russian).

13. Braga C.I., Rezende M.C., Costa M.L. Methodology for DSC calibration in high heating rates. J. Aerosp. Technol. Manag. 2011. no. 3. P. 179–192. DOI: 10.5028/JATM.2011.03021911.

14. Shimkin A. Optimization of DSC calibration procedure. Thermochim. Acta. 2013. no. 266. P. 71–76. DOI: 10.1016/j.tca.2013.04.039.

15. Moukhina E. Enthalpy calibration for wide DSC peaks. Thermochim. Acta. 2011. P. 96–99.