

---

---

УДК 544.1+544.015.3+544.018.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНОЙ СОЛЕВОЙ СИСТЕМЫ KI-KBR-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

© 2024 г. **Финогенов А. А., Фролов Е. И., Гаркушин И. К., Мощенская Е. Ю.**

*Самарский государственный технический университет,*

*Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244*

*e-mail: frolov\_zhenya@inbox.ru*

Поступила в редакцию 25.04.24 г.

После доработки 10.09.24 г.

Принята к публикации 13.09.24 г.

Проведено исследование двух трехкомпонентных и одной четырехкомпонентной солевых систем на основе солей калия. Изучены фазовые равновесия в указанных системах. Показано влияние систем низшей мерности на итоговый вид четырехкомпонентной системы.

**Ключевые слова:** солевые системы, галогениды калия, твердые растворы, минимум

**DOI:** 10.31857/S0132665124050103, **EDN:** NSENBQ

### ВВЕДЕНИЕ

Расплавы солевых систем на основе галогенидов, карбонатов и сульфатов щелочных элементов используются во многих отраслях промышленности. Данные вещества не токсичны для человека, не оказывают негативного влияния на окружающую среду, обладают достаточной термической и химической стойкостью.

Накопление солнечной энергии имеет наибольшее значение, поэтому большое внимание уделяется вопросам аккумулирования тепловой энергии для высвобождения при ее недостатке. Для этого необходимы системы хранения энергии. Они делятся на две основных группы. Это системы явного хранения и системы скрытого (термохимического) хранения тепла. Из них в последнее время наибольшее распространение получили материалы на основе неорганических солей с фазовым переходом. Существует теплоноситель на основе четырехкомпонентной системы из хлоридов щелочных металлов [1]. Разрабатываются композиты с участием хлоридных солей для хранения тепловой энергии, стабилизированные каолином [2], а также материалы на основе эвтектической трехкомпонентной системы из хлоридов и фторидов натрия и калия [3]. Существуют керамические композиты для средне и высокотемпературного хранения тепловой энергии. Например, карбонатно-хлоридные [4] и сульфатно-хлоридные [5, 6].

В настоящий день, предпринимаются попытки создания интеллектуальной энергетической сети, которая позволит автоматизировать надежное и своевременное снабжение энергией конечных пользователей, в зависимости от их потребностей. В связи с этим большой интерес представляют технологии крупномасштабного накопления энергии. Жидкометаллические батареи привлекают все больше внимания, так как лишены проблем, присущих обычным твердотельным

электродам и имеют теоретический срок службы более 15 лет. Важным фактором в разработке данных батарей, является выбор солевого электролита, так как это оказывает непосредственное влияние на характеристики устройства. В качестве электролитов применяются солевые системы на основе хлоридов, фторидов, бромидов, а также йодидов щелочных металлов [7–10].

Жидкосолевые реакторы представляют из себя особый класс энергетических ядерных реакторов, в которых теплоноситель или само топливо представлено расплавом солей. Существует два основных типа. В первом, ядерное топливо растворяется в расплавленной соли, во втором, расплавленная соль служит теплоносителем низкого давления для активной зоны. Отличием этих реакторов является то, что они работают при более высоких температурах и давлении близком к атмосферному. Это увеличивает безопасность и позволяет производить замену топлива без остановки работы реактора. Выбору топливных солей посвящено множество статей в научной литературе [11, 12].

В энергетической атомной промышленности, существует проблема переработки ядерного топлива. Основная цель, заключается в то, чтобы сохранить трансураниевые соединения и отделить продукты деления. Конечным результатом является создание замкнутого топливного цикла. Для решения этой проблемы применяются технологии пирохимической переработки. Она заключается в растворении отработанного топлива в расплавленных солевых системах и последующем электролитическом восстановлении трансураниевых элементов из электролита [13–15].

Несмотря на большое количество проведенных исследований в области изучения систем [16–19], включающих галогениды, сульфаты и карбонаты щелочных элементов, система  $KI-KBr-K_2CO_3-K_2SO_4$  не изучена.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Изучение многокомпонентных солевых систем напрямую связано с описанием фазовых диаграмм состав-температура. Они позволяют нам делать выводы о области применения конкретных солевых композиций. Метод, используемый в работе дифференциальный термический анализ (ДТА), основан на определении температур фазовых переходов, с помощью регистрации разницы температур между исследуемым веществом и эталоном. Данный метод, применяется для исследования широкого спектра систем, солевых, металлических, оксидных, органических, водных и т.д., а также позволяет получать данные необходимые для построения фазовых диаграмм [20, 21].

Было исследовано минимально необходимое количество составов в трехкомпонентных ( $KI-KBr-K_2CO_3$ ,  $KI-KBr-K_2SO_4$ ) и четырехкомпонентной системах  $KI-KBr-K_2CO_3-K_2SO_4$ . Регистрации термоэффектов осуществлялись при охлаждении образцов. Компоненты смеси были гомогенизированы при плавлении. Для эксперимента использовали платиновые микротигли. Измерение температуры производили при помощи платино-платинородиевых проволочных термопар. Регистрирующий прибор, аналого-цифровой преобразователь ЛА-И24USB, подключенный к компьютеру. Холодный спай термопар находился в сосуде Дьюара при температуре 0 °С. В качестве индифферентного вещества применялся оксид алюминия. Калибровка термопар производилась по температурам плавления неорганических солей, относящихся к реперным веществам. Масса навесок составляла 0.3 г. Реактивы, применяемые для исследования, имели квалификацию чистоты «х.ч.».

Таблица 1. Данные по индивидуальным солям и двойным системам [18, 19]

| Вещество   | Тип фазового перехода, тип точки | Характеристики фазового перехода  |                               |             |
|--|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------|
|  |                                  | Температура фазового перехода, °С | Содержание, % <sub>мол.</sub> |             |
|  |                                  |                                   | первой соли                   | второй соли |
| KI   | Плавление                        | 681.0                             | 100.0                         | —           |
| KBr  | Плавление                        | 734.0                             | 100.0                         | —           |
| K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                                 | Плавление                        | 900.0                             | 100.0                         | —           |
|  | α/β-переход                      | 420.0                             |                               |             |
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                 | Плавление                        | 1059.0                            | 100.0                         | —           |
|  | α/β-переход                      | 584.0                             |                               |             |
| KI-KBr   | Минимум (m)                      | 659.0                             | 50.0                          | 50.0        |
| KI-K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                              | Эвтектика (e <sub>1</sub> )      | 612.0                             | 77.0                          | 23.0        |
| KBr-K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                             | Эвтектика (e <sub>2</sub> )      | 630.0                             | 62.0                          | 38.0        |
| KI-K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                              | Эвтектика (e <sub>3</sub> )      | 648.0                             | 86.0                          | 14.0        |
| KBr-K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                             | Эвтектика (e <sub>4</sub> )      | 682.0                             | 82.0                          | 18.0        |
| K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | НПТР без экстремумов             | —                                 | —                             | —           |

Таблица 2. Данные по тройным системам [18, 19]

| Вещество   | Тип неинвариантной точки | Характеристики фазового перехода |                               |             |              |
|--|--------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------|--------------|
|  |                          | Температура, °С                  | Содержание, % <sub>мол.</sub> |             |              |
|  |                          |                                  | первой соли                   | второй соли | третьей соли |
| KI-K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>  |                          | НПТР без экстремумов             |                               |             |              |
| KBr-K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |                          | НПТР без экстремумов             |                               |             |              |

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Последовательность эксперимента состояла в нахождении неинвариантных составов в трехкомпонентных системах, данные по которым в литературе не найдены и построении их фазовых комплексов. И далее используя полученную информацию по трехкомпонентным системам, охарактеризовать и экспериментально определить общий вид в четырехкомпонентной системе KI-KBr-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Исходя из вышеизложенного, первым делом необходимо было построить остоувы изучаемых трехкомпонентных систем. Для этого необходимы литературные данные по температурам фазовых переходов индивидуальных солей и двухкомпонентным системам, исследованным ранее (табл. 1). Также был проведен обзор литературы на предмет исследования трехкомпонентных систем, входящих в общий объект, который показал, что две системы из четырех уже были ранее изучены (табл. 2), а по двум трехкомпонентным системам KI-KBr-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> и KI-KBr-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> информация в литературе отсутствует.

Следующим шагом был расчет составов точек неизвестных систем по методу Мартыновой – Сусарева [22]. Основан на термодинамических соотношениях, справедливых для тройных гетероазеотропных систем. Состав и температура тройной точки

**Таблица 3.** Расчетные и экспериментальные данные температур и составов точек минимума для тройных систем

| № | Содержание компонентов в эвтектике и температура, мол.% и °С |      |                                |       |             |      |                                |       | Погрешность             |                                 |
|---|--|------|--------------------------------|-------|-------------|------|--------------------------------|-------|-------------------------|---------------------------------|
|   | Вычислено  |      |                                |       | Эксперимент |      |                                |       | Максимальная по составу | Относительная по температуре, % |
|   | KI   | KBr  | K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | t, °С | KI          | KBr  | K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | t, °С |                         |                                 |
| 1 | 43.8   | 43.8 | 12.4                           | 589.9 | 40.0        | 40.0 | 20.0                           | 582.0 | 7.6                     | -1.36                           |
|   | 41.1   | 41.1 | 17.7                           | 585.8 |             |      |                                |       | 2.3                     | -0.65                           |
| 2 | 46.2   | 46.2 | 7.5                            | 634.7 | 43.4        | 41.6 | 15.0                           | 620.0 | 7.5                     | -2.29                           |
|   | 43.6   | 43.6 | 12.7                           | 645.0 |             |      |                                |       | 2.3                     | -4.03                           |

системы рассчитываются с использованием данных о бинарных системах, образующих данную систему. На основе метода был разработан алгоритм расчета состава и температуры эвтектического сплава тройных систем [23], который реализован программно в среде визуального программирования Delphi (рис. 1, 3).

Относительная погрешность взята без модуля для того, чтобы видеть, в какую сторону отклонение: если погрешность со знаком «-», это значит, что рассчитанное значение превышает экспериментального и наоборот. В системах KI-KBr-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> и KI-KBr-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> относительная погрешность по температуре не превышает 5% и максимальная по составу 10% (табл. 3).

Из полученных остовов трехкомпонентных систем (рис. 3), визуально видно, что максимальным полем кристаллизации обладают тугоплавкие соли карбонат калия (900 °С) и сульфат калия (1059 °С) для систем KI-KBr-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> и KI-KBr-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> соответственно. Помимо этого, со стороны системы KI-KBr в трехкомпонентных системах, ожидается наличие фазы твердых растворов на основе этих двух солей. Из этого следует, что оптимальными политермическими разрезами для первоначального поиска направления на возможные невариантные составы, должен находиться в полях тугоплавких солей. Следуя указанной логике, нами были выбраны политермические разрезы: для системы KI-KBr-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, это разрез АВ [А (50% KI, 50% K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) – В (50% KBr, 50% K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)]; для системы KI-KBr-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, это разрез FZ [F (70% KI, 30% K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) – Z (70% KBr, 30% K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)]. Последовательным изучением реальных составов, лежащих на этих разрезах, были найдены направления на тройные минимумы (рис. 4). Вывод о том, что мы имеем дело именно с точками минимумов, говорит экспериментальный факт, отсутствия постоянной температуры конечной кристаллизации в составах, а также по результатам анализа термограмм, моновариантная линия, соединяющая боковые стороны разрезов, имеет один термоэффект. Но на рисунках приведено по две точки, которые наносятся на термограмму путем определения начала тепловыделения в процессе охлаждения и его окончания, что соответствует началу и вершине экзо-пика. Также данный подход оправдывается отсутствием у таких экзо-пиков температурной площадки. Дальнейшее действие, заключалось в нахождении составов минимумов, для чего на плоскости остовов составов систем строились невариантные разрезы, путем соединения полученных проекций минимумов из политермических разрезов АВ и FZ с вершинами кристаллизаций

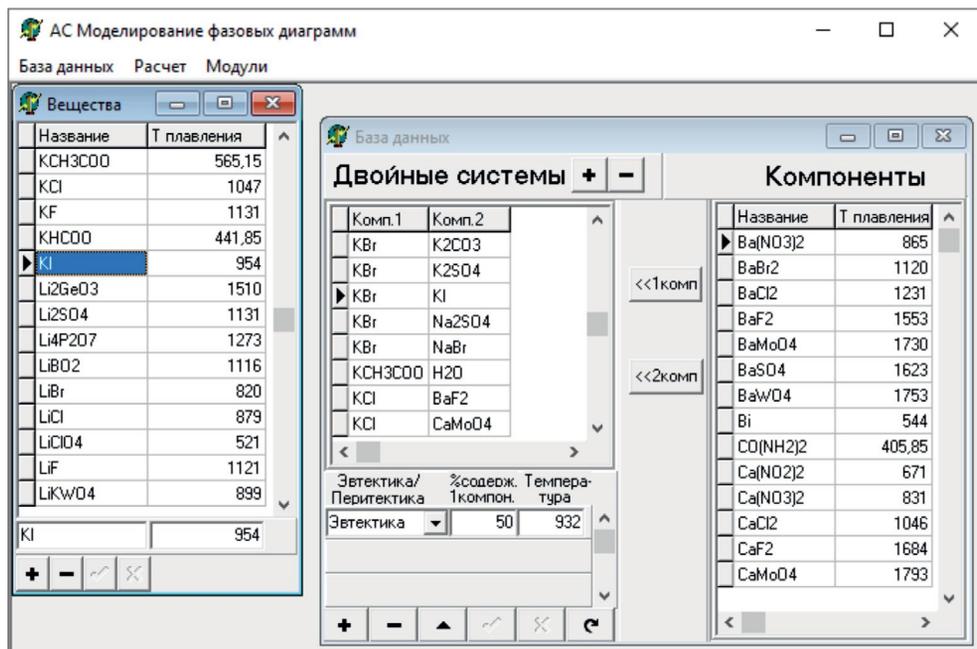


Рис. 1. Ввод данных по компонентам и по двойным системам для расчета состава и температуры минимумов (состав в мол. %, температура в °K).

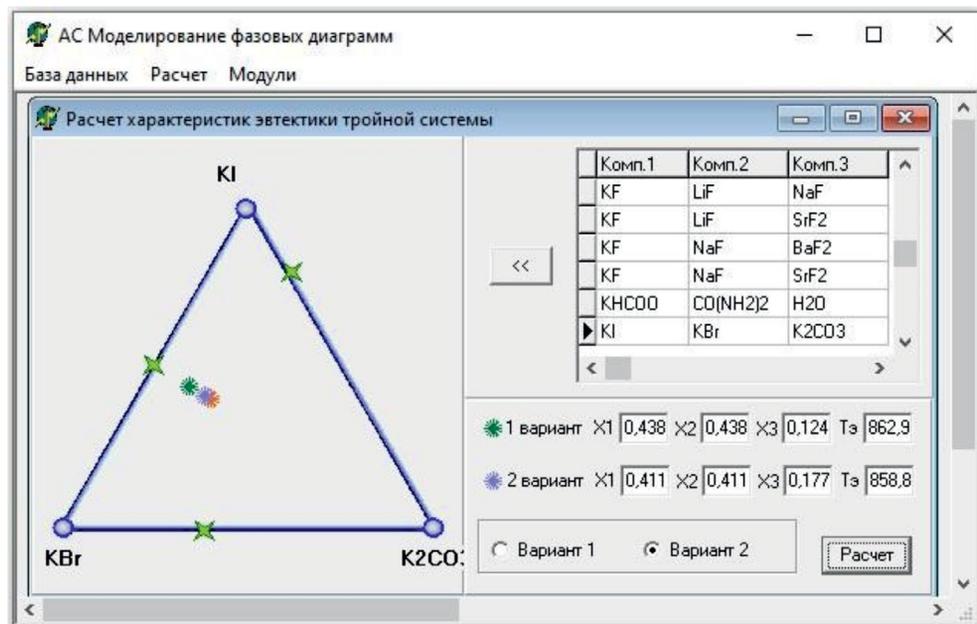


Рис. 2. Вычисление состава и температуры тройной эвтектики.

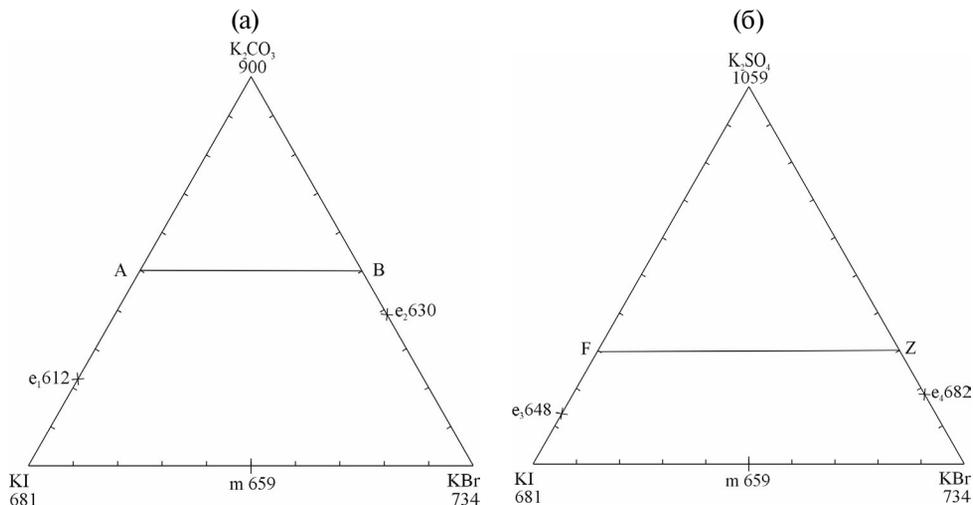


Рис. 3. Остовы систем KI-KBr-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (а) и KI-KBr-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (б).

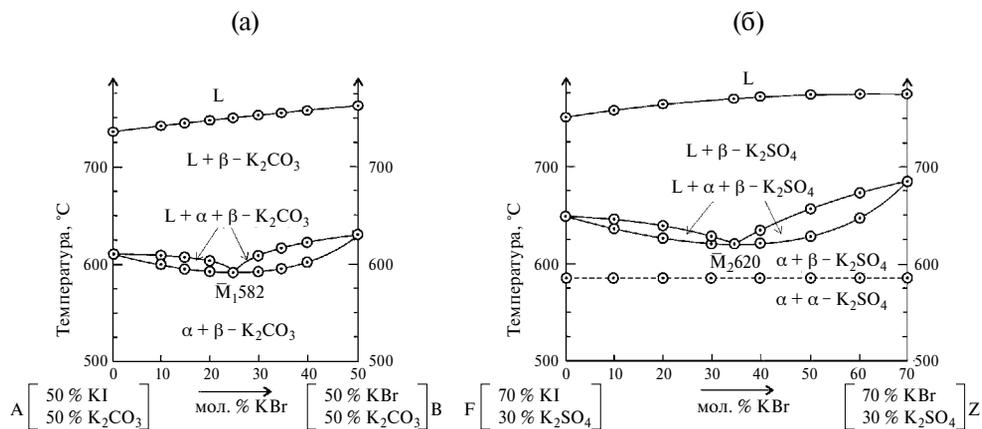


Рис. 4. Политермические разрезы АВ (системы KI-KBr-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) (а) и FZ(системы KI-KBr-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) (б).

солей в поле, которых находились исследованные политермические разрезы. Получается, что неинвариантные разрезы характеризуются, как разрезы, в которых содержание одного из компонентов уменьшается от 100% до 0%, причем на всем протяжении отрезка сохраняется найденное в политермических разрезах, соотношение пары солей KI/KBr. При постепенном уменьшении карбоната калия для системы KI-KBr-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> с 50% и сульфата калия для системы KI-KBr-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> с 30% в построенных неинвариантных разрезах (рис. 5), были найдены реальные составы и температуры плавления тройных минимумов M<sub>1</sub> и M<sub>2</sub>.

На рис. 6 представлен полный фазовый комплекс исследованных трехкомпонентных систем с нанесением всех выбранных и исследованных разрезов для наглядности хода экспериментальной работы. Для уточнения фазового состава, был проведен рентгенофазовый анализ смесей отвечающих точкам тройных

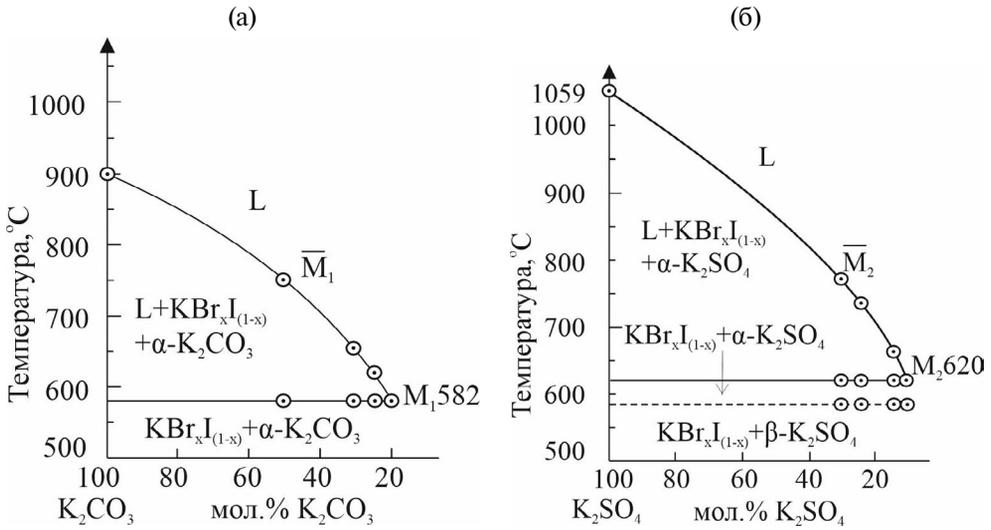


Рис. 5. Нонвариантные разрезы для трехкомпонентных систем KI-KBr-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (а) и KI-KBr-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (б).

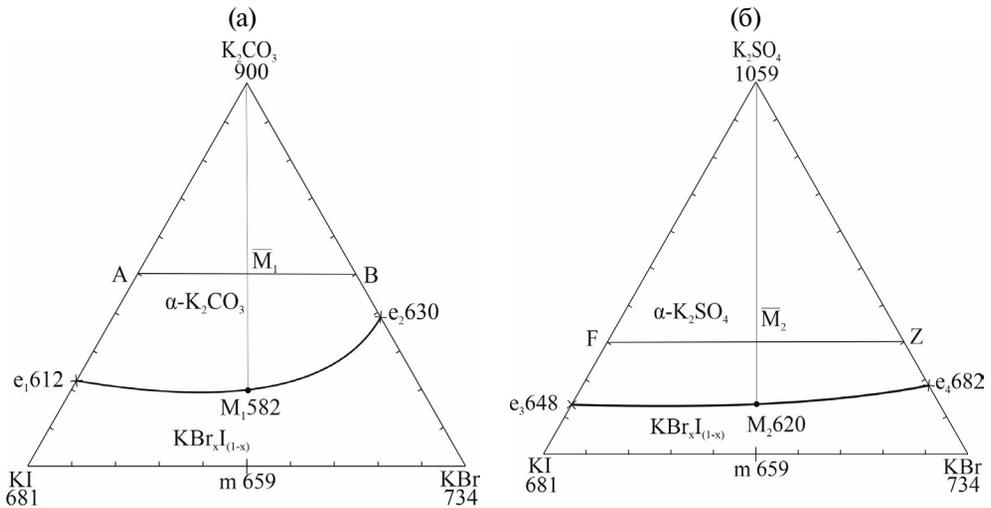


Рис. 6. Фазовый комплекс трехкомпонентных систем KI-KBr-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (а) и KI-KBr-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (б).

минимумов M<sub>1</sub> и M<sub>2</sub> (рис 7). Полученные дифрактограммы подтверждают фазовый состав систем.

Последним этапом экспериментальной работы, являлось исследование четырехкомпонентной системы KI-KBr-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и построение объемов кристаллизации, выраженной через тетраэдр составов. Первым шагом является нанесение всех имеющихся данных на развертку четырехкомпонентной системы, а также для большей наглядности было выполнено построение предварительного эскиза объема кристаллизации в системе (рис. 8). Анализируя, полученный объем, пришли к предварительному выводу, что в выбранной системе

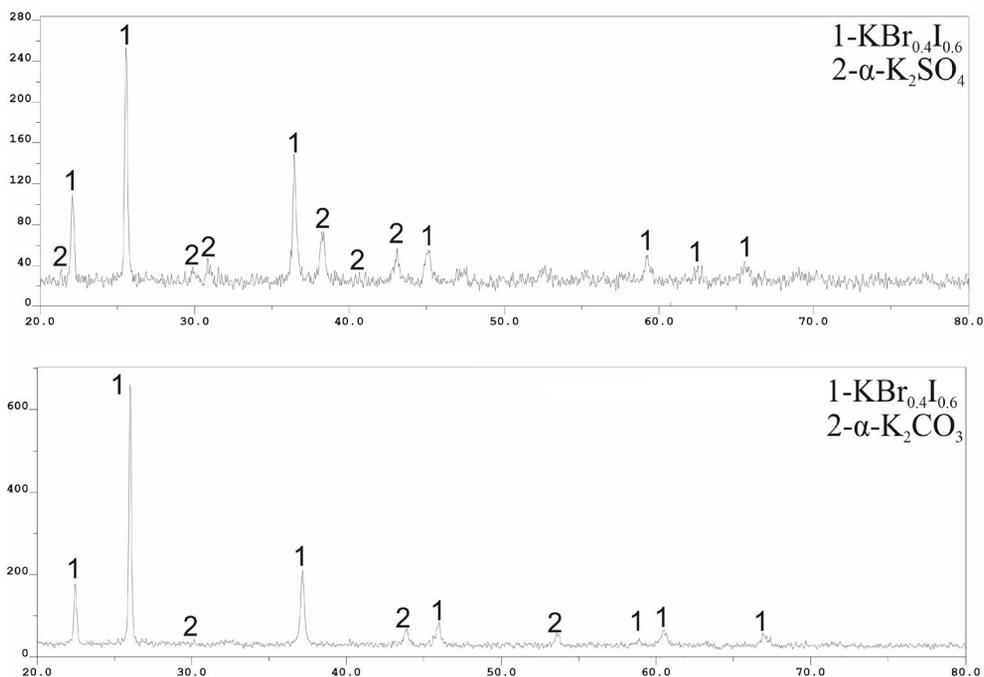


Рис. 7. Дифрактограммы смесей отвечающих составам М<sub>1</sub> и М<sub>2</sub>.

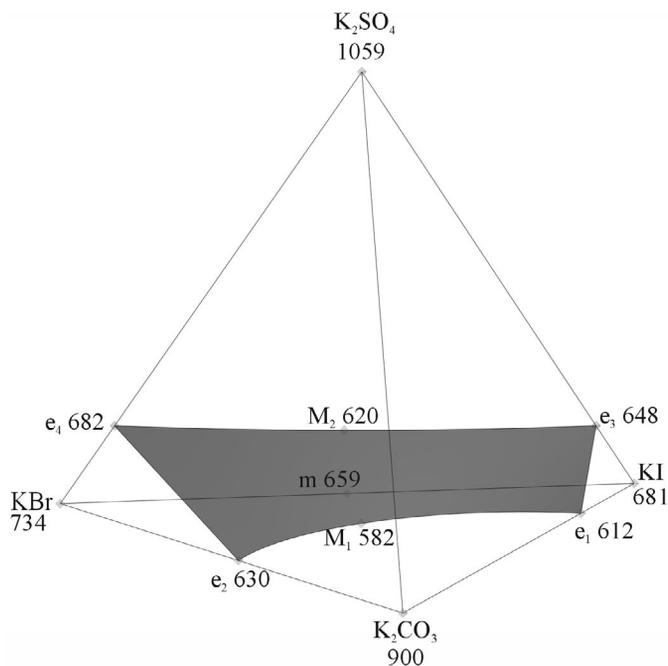
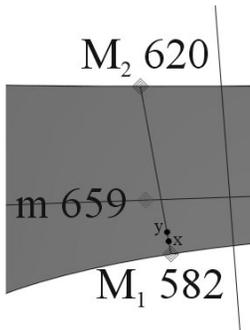


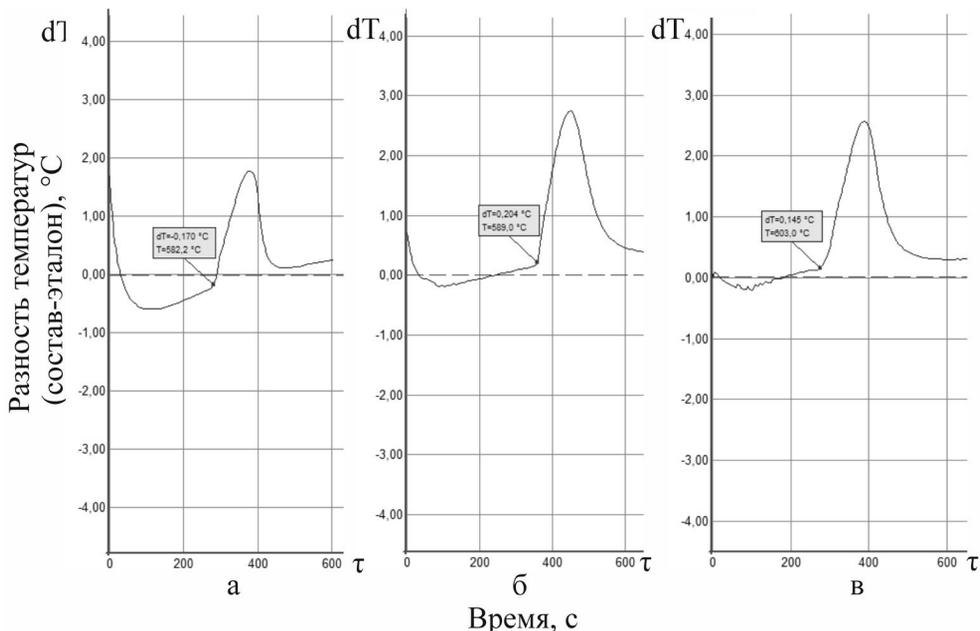
Рис. 8. Эскиз объема кристаллизации в четырехкомпонентной системе KI-KBr-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.



**Рис. 9.** Точки  $x$  и  $y$  на линии, соединяющей  $M_1$  и  $M_2$  в четырехкомпонентной системе  $KI-KBr-K_2CO_3-K_2SO_4$ .

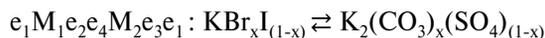
нахождение четвертого минимума маловероятно. Это связано с тем, что по линиям, соединяющим точки низшей мерности, можно наблюдать снижение температуры по принципу, характерному для непрерывного ряда твердых растворов без экстремумов. А именно по линиям:  $e_4-e_2$  (от 682 °С до 630 °С),  $e_3-e_1$  (от 648 °С до 612 °С) и предварительно (т.к. экспериментальных данных в объеме, нет)  $M_2-M_1$  (от 620 °С до 582 °С). Для закрепления выдвинутого предположения, было решено исследовать два состава в объеме четырехкомпонентной системы  $KI-KBr-K_2CO_3-K_2SO_4$ . Первый состав точка  $x$   $KI$ -38.2 мол. %;

$KBr$ -38.1 мол. %;  $K_2CO_3$ -21.7 мол. %;  $K_2SO_4$ -2.0 мол. %, лежащий на линии соединяющий  $M_1-M_2$  (от меньшей температуры к большей) с общим содержанием сульфата калия 2%. Второй состав точка  $y$   $KI$ -36.4 мол. %;  $KBr$ -36.4 мол. %;  $K_2CO_3$ -24.2 мол. %;  $K_2SO_4$ -3.0 мол. %, лежащий на линии  $M_1-K_2SO_4$  с содержанием сульфата калия 3% (рис. 9). Разность содержания сульфата калия, связана с разностью наклона линий  $M_1-M_2$  и  $M_1-K_2SO_4$ . Выбор именно этих значений процентов сульфата калия, обосновывается с точки зрения получения составов отличных от самой низкотемпературной точки на элементах ограничения. Получились



**Рис. 10.** Термограммы: а) точка  $M_1$  ( $KI$ -40.0%;  $KBr$ -40.0%;  $K_2CO_3$ -20.0%); б) точка  $x$  на линии  $M_1-M_2$  ( $KI$ -38.2%;  $KBr$ -38.1%;  $K_2CO_3$ -21.7%;  $K_2SO_4$ -2.0%); в) точка  $y$  на линии  $M_1-K_2SO_4$  ( $KI$ -36.4%;  $KBr$ -36.4%;  $K_2CO_3$ -24.2%;  $K_2SO_4$ -3.0%).

следующие термограммы (рис. 10), из которых видно, что при переходе от точки  $M_1$  (лежащей в плоскости системы KI-KBr- $K_2CO_3$ ) в объем четырехкомпонентной системы, температура возрастает в независимости от выбранного направления к  $M_2$  или  $K_2SO_4$ . Этого экспериментального подтверждения, достаточно, чтобы утверждать, что в четырехкомпонентной системе KI-KBr- $K_2CO_3$ - $K_2SO_4$ , нет более низкоплавкого состава, чем точка  $M_1$ . Следовательно, объем системы имеем две кристаллизующиеся фазы без точек перегибов (экстремумов), и обе относятся к типу твердых растворов а именно  $KBr_xI_{(1-x)}$  и  $K_2(CO_3)_x(SO_4)_{(1-x)}$ . Плоскость их, разделяющую можно описать следующим образом:



### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суть работы заключалась в определение общего фазового состава в не исследованных трех- и четырехкомпонентной системах, а также определение температуры и составов для всех невариантных составов, которые есть в объекте исследования и данные, по которым в литературе ранее не публиковались. Мы получили следующие значения по системам:

KI-KBr- $K_2CO_3$  поверхность ликвидуса представлена фазами  $KBr_xI_{(1-x)}$ ,  $\beta$ - $K_2CO_3$ . Точка минимума  $M_1$ , имеющая координаты KI-40.0%; KBr-40.0%;  $K_2CO_3$ -20.0% и температуру плавления 582 °C

KI-KBr- $K_2SO_4$  поверхность ликвидуса представлена фазами  $KBr_xI_{(1-x)}$ ,  $\beta$ - $K_2SO_4$ . Точка минимума  $M_2$ , имеющая координаты KI-43.4%; KBr-41.6%;  $K_2SO_4$ -15.0% и температуру плавления 620 °C.

KI-KBr- $K_2CO_3$ - $K_2SO_4$  объем кристаллизации представлен фазами  $KBr_xI_{(1-x)}$ ,  $K_2(CO_3)_x(SO_4)_{(1-x)}$ . Экспериментально подтверждено, что точки экстремума в системе не существует.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

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 данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wu S., Peng H., Ao J., Xie L. Design and development of novel LiCl–NaCl–KCl–ZnCl<sub>2</sub> eutectic chlorides for thermal storage fluids in concentrating solar power (CSP) applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, vol. 240, pp. 111678.
2. Zhang T., Wang T., Wang K., Xu C., Ye F. Development and characterization of NaCl–KCl/Kaolin composites for thermal energy storage. *Solar Energy*, 2021. V. 227. P. 468–476. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.09.020>
3. Liu M., Li X., Wang Y., Xu T., Yan L., Tang Z. Elaborating the high thermal storage and conductivity of molten NaCl–KCl–NaF eutectic from microstructures by FPMD simulations. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, vol. 346, pp. 117054.
4. Ge Z., Ye F., Cao H., Leng G., Qin Y., Ding Y. Ge Z. Carbonate-salt-based composite materials for medium-and high-temperature thermal energy storage. *Particuology*, 2014, vol. 15, pp. 77–81.

5. Jiang Y., Sun Y., Jacob R., Bruno F., Li S. Novel Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-NaCl-ceramic composites as high temperature phase change materials for solar thermal power plants (Part I), *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, vol. 178, pp. 74–83.
6. Jiang Y., Sun Y., Li S. Performance of novel Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-NaCl-ceramic composites as high temperature phase change materials for solar power plants (Part II), *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, vol. 194, pp. 285–294.
7. Xu L., Wang B., Han F., Liu S., Sheng P., Li H., He C. Electronic, thermodynamic and ion transport properties of the LiCl, LiBr and LiF electrolytes of liquid metal batteries. *Chemical Physics Letters*, 2020, vol. 744, pp. 137210.  
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.05.028>
8. Gong Q., Ding W., Bonk A., Li H., Wang K., Jianu A., Bauer T. Molten iodide salt electrolyte for low-temperature low-cost sodium-based liquid metal battery. *Journal of Power Sources*, 2020, vol. 475, pp. 228674.
9. Zhang S., Liu Y., Fan Q., Zhang C., Zhou T., Kalantar-Zadeh K., Guo Z. Liquid metal batteries for future energy storage. *Energy & Environmental Science*, 2021, vol. 14, №. 8, pp. 4177–4202.
10. Liu D., Bai Z., Li M., Yu A., Luo D., Liu W., Chen Z. Developing high safety Li-metal anodes for future high-energy Li-metal batteries: strategies and perspectives. *Chemical Society Reviews*, 2020, vol. 49, №. 15, pp. 5407–5445.
11. Serp J., Allibert M., Beneš O., Delpech S., Feynberg O., Ghetta V., Zhimin D. The molten salt reactor (MSR) in generation IV: overview and perspectives. *Progress in Nuclear Energy*, 2014, vol. 77, pp. 308–31.
12. Uhlíř J. Chemistry and technology of Molten Salt Reactors—history and perspectives. *Journal of nuclear materials*, 2007, vol. 360, №. 1, pp. 6–11.
13. Fredrickson G. L., Yoo T. S. Analysis and modeling of the equilibrium behaviors of U and Pu in molten LiCl-KCl/Cd system at 500 °C. *Journal of Nuclear Materials*, 2018, vol. 508, pp. 51–62.
14. Mullabaev A., Tkacheva O., Shishkin V., Kovrov V., Zaikov Y., Sukhanov L., Mochalov Y. Properties of the LiCl-KCl-Li<sub>2</sub>O system as operating medium for pyro-chemical reprocessing of spent nuclear fuel. *Journal of Nuclear Materials*, 2018, vol. 500, pp. 235–241.
15. Tang H., Du Y., Li Y., Wang M., Wang H., Yang Z., Gao R. Electrochemistry of UBr<sub>3</sub> and preparation of dendrite-free uranium in LiBr-KBr-CsBr eutectic melts. *Journal of Nuclear Materials*, 2018, vol. 508, pp. 403–410.
16. Финогенов А. А., Гаркушин И. К., Фролов Е. И. Фазовые равновесия в системах NaCl–NaBr–Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> и NaCl–NaBr–Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *Физика и химия стекла*, 2022. Т. 48. № 6. С. 783–790.
17. Фролов, Е. И., Финогенов А. А., Гаркушин И. К., Сырова В. И. Фазовые равновесия в системе LiBr–Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>–Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и анализ систем LiHal–Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>–Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Hal=F, Cl, Br, I) *Журнал неорганической химии*, 2020. Т. 65. № 3, С. 384–390.
18. Воскресенская Н. К., Евсеева Н. К., Беруль С. И., Верещатина И. П. Справочник по плавкости систем из безводных неорганических солей. Москва. Изд-во АН СССР, 1961, Т. 1, 845 с.
19. Васина Н. А., Грызлова Е. С., Шапошникова С. Г. Теплофизические свойства многокомпонентных солевых систем. Москва. Химия, 1984, 112 с.
20. Danilov V. P., Frolova E. A., Kondakov D. F., Sveshnikova L. B. Application of physicochemical analysis to developing and studying deicing agents. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2019, vol. 64, № 9, pp. 1165.
21. Melling R., Wilburn F. W., McIntosh R. M. Study of thermal effects observed by differential thermal analysis. Theory and its application to influence of sample parameters on a typical DTA curve. *Analytical chemistry*, 1969, vol. 41, №. 10, pp. 1275–1286.
22. Мартынова Н. С., Сусарев М. П. Расчет температуры плавления тройной эвтектики простой эвтектической системы по данным о бинарных эвтектиках и компонентах. *Журнал прикладной химии*, 1971. Т. 44. С. 2643–2646.
23. Гаркушин И. К., Губанова Т. В., Фролов Е. И., Мощенская Е. Ю., Баталов Н. Н., Захаров В. В. Расчет составов низкоплавких электролитов в тройных солевых системах. *Электротехническая энергетика*, 2010. Т. 10. №. 3. С. 147–152.