

УДК 541.123.3+543.572.3

ТРЕХКОМПОНЕНТНАЯ ВЗАИМНАЯ СИСТЕМА  $\text{Li}^+$ ,  $\text{K}^+ \parallel \text{Br}^-$ ,  $\text{WO}_4^{2-}$ © 2023 г. М. А. Истомова<sup>1</sup>, \*, И. К. Гаркушин<sup>1</sup><sup>1</sup>Самарский государственный технический университет, ул. Молодогвардейская, 244, Самара, 443100 Россия

\*e-mail: mariaistomova@mail.ru

Поступила в редакцию 30.03.2023 г.

После доработки 16.07.2023 г.

Принята к публикации 17.07.2023 г.

В работе исследована трехкомпонентная взаимная система  $\text{Li}^+$ ,  $\text{K}^+ \parallel \text{Br}^-$ ,  $\text{WO}_4^{2-}$ . Вероятный вариант разбиения системы на вторичные фазовые треугольники выбран на основе термодинамического расчета энтальпий и энергий Гиббса реакций обмена и подтвержден исследованием стабильных секущих  $\text{KBr-Li}_2\text{WO}_4$  и  $\text{KBr-Li}_2\text{WO}_4\cdot\text{K}_2\text{WO}_4$  методом дифференциального термического анализа. Показано, что стабильные секущие представляют собой квазибинарные системы, для которых построены  $T$ - $x$ -фазовые диаграммы. Построено древо фаз системы, имеющее линейное строение, включающее три стабильных треугольника  $\text{LiBr-KBr-Li}_2\text{WO}_4$ ,  $\text{KBr-Li}_2\text{WO}_4\text{-Li}_2\text{WO}_4\cdot\text{K}_2\text{WO}_4$  и  $\text{KBr-Li}_2\text{WO}_4\cdot\text{K}_2\text{WO}_4\text{-K}_2\text{WO}_4$ , соединяющихся двумя стабильными секущими. Для выявления тройных эвтектических смесей в стабильных треугольниках построены  $T$ - $x$ -фазовые диаграммы ряда сечений. Для квазидвойных и тройных эвтектик измерена удельная энтальпия плавления. В системе  $\text{Li}^+$ ,  $\text{K}^+ \parallel \text{Br}^-$ ,  $\text{WO}_4^{2-}$  тройная смесь с минимальной температурой плавления  $328^\circ\text{C}$  имеет максимальное значение удельной энтальпии плавления – 200 кДж/кг.

**Ключевые слова:** фазовое равновесие, бромиды и вольфраматы лития и калия, эвтектика, квазибинарный, политермический, энтальпия плавления

**DOI:** 10.31857/S0002337X23070060, **EDN:** PTZQGW

## ВВЕДЕНИЕ

Реакции обмена с участием галогенидов и вольфраматов щелочных металлов могут быть осуществлены в растворах [1, 2], расплавах [3, 4] и твердофазным взаимодействием [5]. Поэтому исследование фазовых диаграмм взаимных солевых систем с участием указанных компонентов и химического взаимодействия в них имеет не только теоретический, но и практический интерес для разработки теплоаккумулирующих смесей [6], электролитов для химических источников тока [7], растворителей неорганических веществ [8].

Трехкомпонентная взаимная система  $\text{Li}^+$ ,  $\text{K}^+ \parallel \text{Br}^-$ ,  $\text{WO}_4^{2-}$  авторами изучена впервые. Двухкомпонентные системы – грани трехкомпонентной взаимной системы  $\text{Li}^+$ ,  $\text{K}^+ \parallel \text{Br}^-$ ,  $\text{WO}_4^{2-}$  – исследованы ранее:  $\text{LiBr-KBr}$  [9],  $\text{Li}_2\text{WO}_4\text{-K}_2\text{WO}_4$  [10],  $\text{LiBr-Li}_2\text{WO}_4$  [11],  $\text{KBr-K}_2\text{WO}_4$  [12]. Все элементы ограничения системы  $\text{Li}^+$ ,  $\text{K}^+ \parallel \text{Br}^-$ ,  $\text{WO}_4^{2-}$  носят эвтектический характер, а на одной бинарной стороне  $\text{Li}_2\text{WO}_4\text{-K}_2\text{WO}_4$  имеется конгруэнтное соединение  $D$  ( $\text{Li}_2\text{WO}_4\cdot\text{K}_2\text{WO}_4$ ).

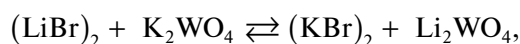
Целью настоящей работы является исследование фазовых равновесий трехкомпонентной взаимной системы  $\text{Li}^+$ ,  $\text{K}^+ \parallel \text{Br}^-$ ,  $\text{WO}_4^{2-}$  и определение характеристик эвтектических смесей в данной системе.

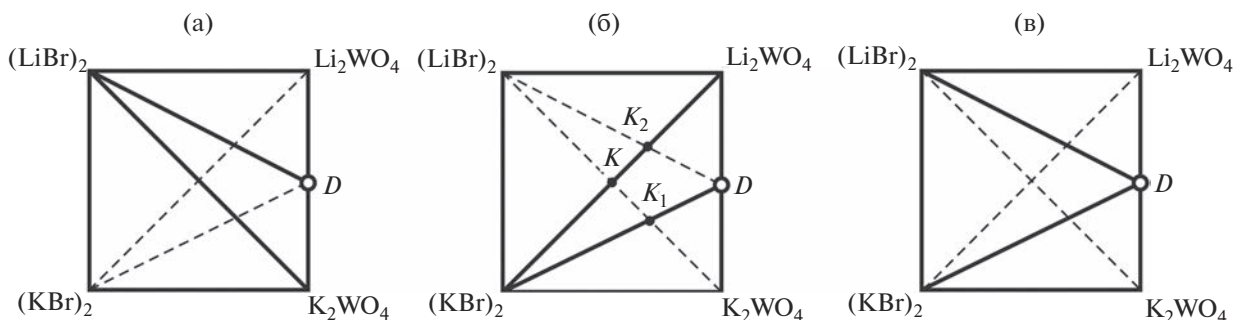
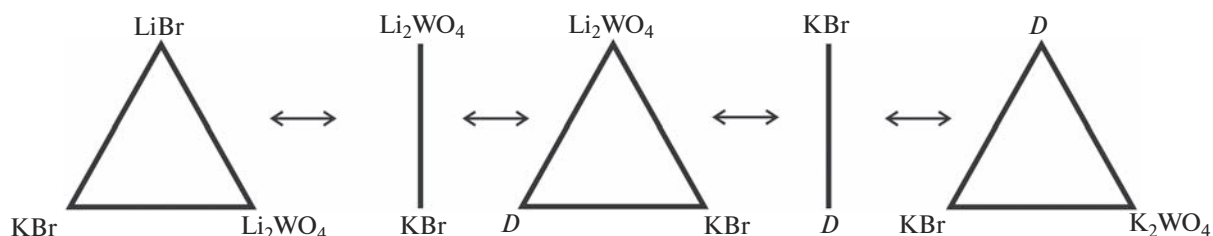
## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Теоретическое описание химического взаимодействия проведено конверсионным методом [13–15], а также методом ионного баланса [16, 17]. Вследствие наличия двойного соединения  $D$  ( $\text{Li}_2\text{WO}_4\cdot\text{K}_2\text{WO}_4$ ) на стороне  $\text{Li}_2\text{WO}_4\text{-K}_2\text{WO}_4$  в системе  $\text{Li}^+$ ,  $\text{K}^+ \parallel \text{Br}^-$ ,  $\text{WO}_4^{2-}$  возможны три варианта разбиения, представленные на рис. 1.

Теоретически тип разбиения был определен термодинамическим методом исходя из значений энергии Гиббса реакции обмена  $\Delta_r G^\circ$  и энтальпии реакции обмена  $\Delta_r H^\circ$ , происходящей в системе  $\text{Li}^+$ ,  $\text{K}^+ \parallel \text{Br}^-$ ,  $\text{WO}_4^{2-}$ :

для смеси в точке эквивалентности  $K$ :

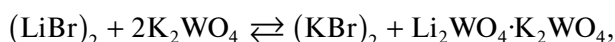


Рис. 1. Варианты разбиения системы  $\text{Li}^+, \text{K}^+ \parallel \text{Br}^-, \text{WO}_4^{2-}$ .Рис. 2. Древо фаз системы  $\text{Li}^+, \text{K}^+ \parallel \text{Br}^-, \text{WO}_4^{2-}$ .

$$\Delta_r G_{298}^\circ = -103.923 \text{ кДж},$$

$$\Delta_r H_{298}^\circ = -108.315 \text{ кДж};$$

для смеси в точке эквивалентности  $K_1$ :



$$\Delta_r G_{298}^\circ = -103.923 \text{ кДж},$$

$$\Delta_r H_{298}^\circ = -108.315 \text{ кДж};$$

для смеси в точке эквивалентности  $K_2$ :



$$\Delta_r G_{298}^\circ = -103.923 \text{ кДж},$$

$$\Delta_r H_{298}^\circ = -108.315 \text{ кДж}.$$

Для варианта разбиения, показанного на рис. 1б, построено древо фаз, имеющее линейное строение (рис. 2) и включающее три стабильных вторичных треугольника  $\text{LiBr}-\text{KBr}-\text{Li}_2\text{WO}_4$ ,  $\text{KBr}-\text{Li}_2\text{WO}_4-D$  и  $\text{KBr}-D-\text{K}_2\text{WO}_4$ , соединяющихся между собой двумя стабильными секущими  $\text{KBr}-\text{Li}_2\text{WO}_4$  и  $\text{KBr}-D$ .

#### МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исходные вещества квалификаций “х.ч.” ( $\text{LiBr}$ ), “ос.ч.” ( $\text{KBr}$ ) были предварительно высушены, а

“ч.” ( $\text{Li}_2\text{WO}_4$  и  $\text{K}_2\text{WO}_4$ ) очищены методом перекристаллизации и обезвожены. Данные по термическим и физическим свойствам исходных веществ, используемых в работе, приведены в табл. 1.

Экспериментальное исследование фазовой диаграммы системы проведено методом дифференциального термического анализа (ДТА) [21–24]. Кривые охлаждения и нагревания получали на установке, включающей шахтную печь, программатор нагрева, датчик термо-ЭДС – комбинированную Pt–Pt/Rh-термопару, регистратор – АЦП с выводом цифрового сигнала на компьютер. Погрешность измерения температуры составила  $\pm 2.5^\circ\text{C}$ . Реактивы взвешивались на электронных аналитических весах Simadzu AUX 220 в сухом боксе. Взвешенные вещества массой 0.3 г помещали в платиновый тигель, который опускали в печь шахтного типа. Второй тигель был заполнен свежeproкаленным  $\text{Al}_2\text{O}_3$  “ч.д.а.”.

Для выявленных эвтектических смесей определяли удельную энтальпию плавления с помощью микрокалориметра теплового потока [25]. Снимали не менее трех кривых охлаждения и нагревания эталонного вещества и исследуемого эвтектического состава. Использованы следующие эталонные вещества: для  $E 587$  и  $E 575$  –  $\text{CsCl}$  ( $t_{\text{пл}} = 645^\circ\text{C}$ ,  $\Delta_m H = 121 \text{ кДж/кг}$ ); для  $E 328$  –  $\text{KNO}_3$  ( $t_{\text{пл}} = 338^\circ\text{C}$ ,  $\Delta_m H = 116 \text{ кДж/кг}$ ) [10]; для  $E 526$  и  $E 531$  –  $\text{LiBr}$  ( $t_{\text{пл}} =$

**Таблица 1.** Термические, термодинамические и физические свойства исходных веществ [18–20]

Вещество	Температура плавления и фазового перехода, °С	$-\Delta_f H_{298}^\circ$ , кДж/моль	$-\Delta_f G_{298}^\circ$ , кДж/моль	Энтальпия плавления		$\rho_{298}$ , кг/м <sup>3</sup>
				кДж/моль	кДж/кг	
LiBr	550	351.038	341.732	17.656	203.55	3460
KBr	734	393.480	380.108	25.522	214.73	2750
Li <sub>2</sub> WO <sub>4</sub>	743 $\alpha \rightarrow \beta$ : 675	1603.727	1488.043	28.45	108.83	3710
K <sub>2</sub> WO <sub>4</sub>	923 $\alpha \rightarrow \beta$ : 375 $\beta \rightarrow \gamma$ : 455	1580.296	1460.872	30.961	95.07	3110
<i>D</i> (Li <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> -K <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> )	626 $\alpha \rightarrow \beta$ : 360	3184.023	2948.915	–	–	–

= 550°C,  $\Delta_m H = 204$  кДж/кг [9]. Площади пиков дифференциальных кривых ДТА ограничивали в соответствии с рекомендациями Международного комитета по стандартизации в термическом анализе [23]. Для экспериментального определения удельных энтальпий эвтектик применили метод сравнения с удельной энтальпией плавления эталонных веществ по формуле:

$$\Delta_m H_E = \Delta_m H_{эт} \frac{S_{обр} T_E}{S_{эт} T_{эт}} \quad (\text{кДж/кг}), \quad (1)$$

где  $\Delta_m H_{эт}$  и  $\Delta_m H_E$  – удельная энтальпия фазового перехода эталонного вещества, близкого по температуре фазового перехода к исследуемому составу, и удельная энтальпия фазового перехода эвтектического состава (кДж/кг);  $S_{эт}$  и  $S_{обр}$  – площади пиков дифференциальных кривых, отвечающих плавлению эвтектического состава и фазовому переходу эталонного вещества соответственно;  $T_{эт}$  – температура плавления эталона (К);  $T_E$  – температурѣ плавления эвтектического состава образца (К). Точность определения удельных энтальпий плавления  $\pm 5\%$ .

Для подтверждения теоретического разбиения системы  $\text{Li}^+$ ,  $\text{K}^+ \parallel \text{Br}^-$ ,  $\text{WO}_4^{2-}$  экспериментально исследовали стабильные сечения  $\text{KBr}-D$  и  $\text{KBr}-\text{Li}_2\text{WO}_4$ . Положения всех изучаемых в работе сечений системы  $\text{Li}^+$ ,  $\text{K}^+ \parallel \text{Br}^-$ ,  $\text{WO}_4^{2-}$  изображены на рис. 3.

Экспериментально полученные при помощи ДТА  $T-x$ -диаграммы  $\text{KBr}-D$  и  $\text{KBr}-\text{Li}_2\text{WO}_4$  представлены на рис. 4 и 5 соответственно. В результате определены составы и температуры квазибинарных эвтектик: 23.5% ( $\text{KBr}$ )<sub>2</sub> и 587°C; 16% ( $\text{KBr}$ )<sub>2</sub>, 42%  $\text{Li}_2\text{WO}_4$ , 42%  $\text{K}_2\text{WO}_4$  и 575°C, из чего следует, что сечения являются триангулирующими. Таким образом, квадрат составов трехкомпонентной взаимной системы разбивается на три фазовых треугольника:  $\text{KBr}-\text{Li}_2\text{WO}_4-D$ ,  $\text{KBr}-\text{K}_2\text{WO}_4-D$  и  $\text{KBr}-\text{LiBr}-\text{Li}_2\text{WO}_4$ .

Далее для нахождения направлений на трехкомпонентные эвтектики в системе  $\text{Li}^+$ ,  $\text{K}^+ \parallel \text{Br}^-$ ,  $\text{WO}_4^{2-}$  были изучены  $T-x$ -диаграммы следующих сечений, расположение которых показано на рис. 3:

1)  $A$  [50%( $\text{KBr}$ )<sub>2</sub> + 50% $\text{K}_2\text{WO}_4$ ]- $B$  [50%( $\text{KBr}$ )<sub>2</sub> + 50% $D$ ] в симплексе  $\text{K}_2\text{WO}_4-\text{KBr}-D$ ;

2)  $M$  [35%( $\text{KBr}$ )<sub>2</sub> + 65% $\text{Li}_2\text{WO}_4$ ]- $N$  [35%( $\text{KBr}$ )<sub>2</sub> + 65% $D$ ] в симплексе  $\text{Li}_2\text{WO}_4-\text{KBr}-D$ ;

3)  $L$  [50%( $\text{KBr}$ )<sub>2</sub> + 50%( $\text{LiBr}$ )<sub>2</sub>]- $K$  [50%( $\text{KBr}$ )<sub>2</sub> + 50% $\text{Li}_2\text{WO}_4$ ] в симплексе  $\text{LiBr}-\text{Li}_2\text{WO}_4-\text{KBr}$ .

Построенные  $T-x$ -диаграммы сечений  $A-B$ ,  $M-N$  и  $L-K$  изображены на рис. 6. Линии вторичной кристаллизации –  $\text{KBr} + D$  и  $\text{KBr} + \gamma-\text{K}_2\text{WO}_4$  (рис. 6а),  $\text{KBr} + D$  и  $\text{KBr} + \alpha-\text{Li}_2\text{WO}_4$  (рис. 6б),  $\text{KBr} + \text{LiBr}$  и  $\text{KBr} + \alpha-\text{Li}_2\text{WO}_4$  (рис. 6в) – пересекаются с эвтектическими прямыми в точках  $\bar{E} 531$ ,  $\bar{E} 526$  и  $\bar{E} 328$ , которые будут являться направления-

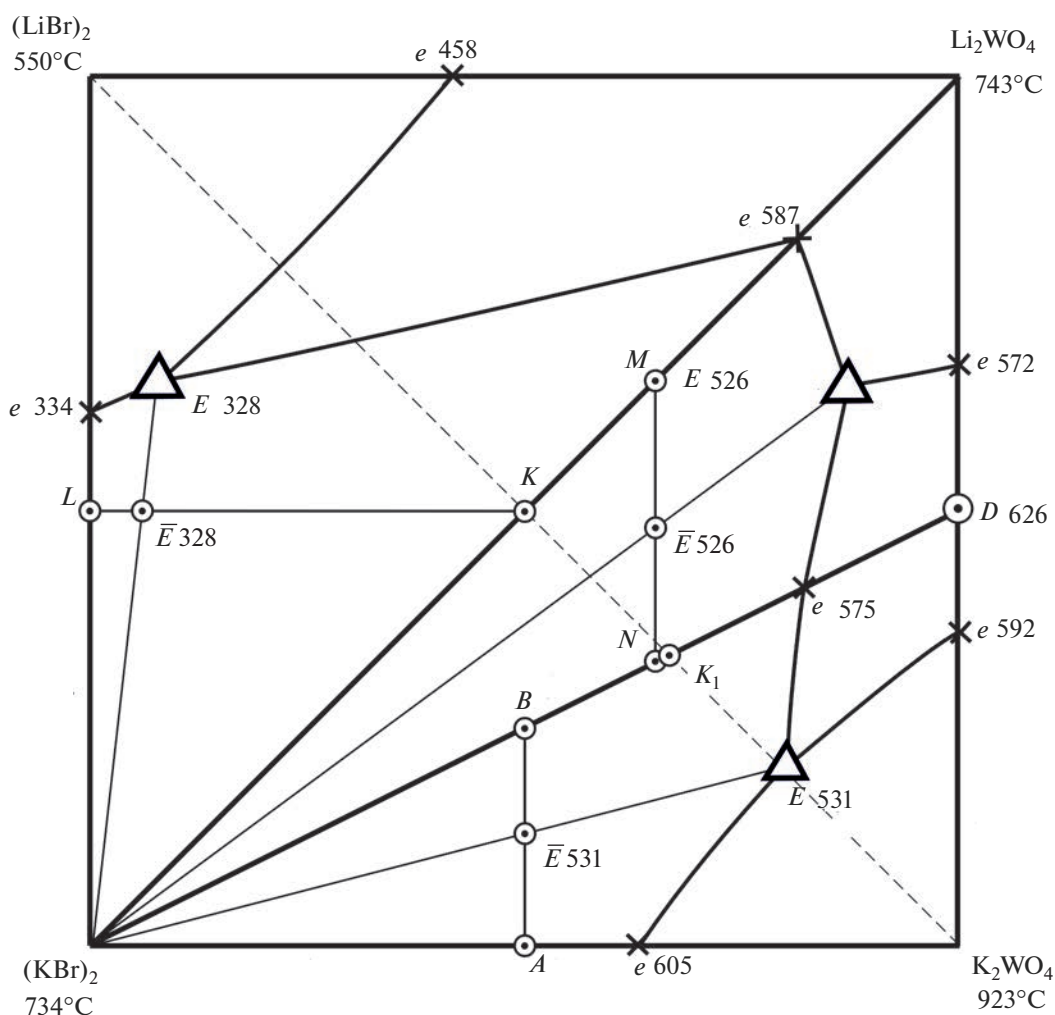


Рис. 3. Положения эвтектических точек и линий вторичного выделения в системе  $\text{Li}^+, \text{K}^+ \parallel \text{Br}^-, \text{WO}_4^{2-}$ .

Таблица 2. Характеристики эвтектик системы  $\text{Li}^+, \text{K}^+ \parallel \text{Br}^-, \text{WO}_4^{2-}$

Эвтектика, °C	Состав, экв. %			
	(LiBr) <sub>2</sub>	Li <sub>2</sub> WO <sub>4</sub>	(KBr) <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> WO <sub>4</sub>
e 587	—	76.5	23.5	—
e 575	—	42	16	42
E 328	58.5	6.5	35	—
E 526	—	64.5	12.5	23
E 531	—	21	20	59

ми на трехкомпонентные эвтектики системы  $\text{Li}^+, \text{K}^+ \parallel \text{Br}^-, \text{WO}_4^{2-}$ .

Для нахождения характеристик трехкомпонентных эвтектик экспериментально изучены политермические сечения из полюса кристаллизации бромида калия:  $\text{KBr} \rightarrow \bar{E} 531 \rightarrow E 531$  (рис. 7а),  $\text{KBr} \rightarrow \bar{E} 526 \rightarrow E 526$  (рис. 7б) и  $\text{KBr} \rightarrow \bar{E} 328 \rightarrow E 328$  (рис. 7в), с помощью которых определены составы и температуры плавления тройных эвтектик системы  $\text{Li}^+, \text{K}^+ \parallel \text{Br}^-, \text{WO}_4^{2-}$ . Результаты экспериментального исследования представлены на рис. 3 и в табл. 2. Экспериментальные данные по энтальпиям плавления эвтектических составов занесены в табл. 3.

Исходя из экспериментального значения удельной энтальпии плавления  $\Delta_m H^{\text{экср}}$  (кДж/кг) и плотности  $\rho^{\text{ад}}$  (кг/м<sup>3</sup>), рассчитанной по аддитивности

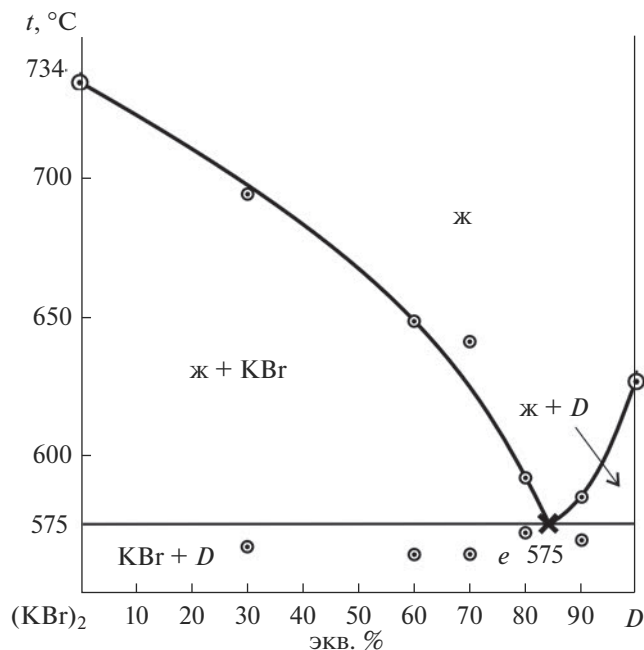


Рис. 4.  $T$ - $x$ -диаграмма сечения  $\text{KBr}-D$  системы  $\text{Li}^+, \text{K}^+ \parallel \text{Br}^-, \text{WO}_4^{2-}$ .

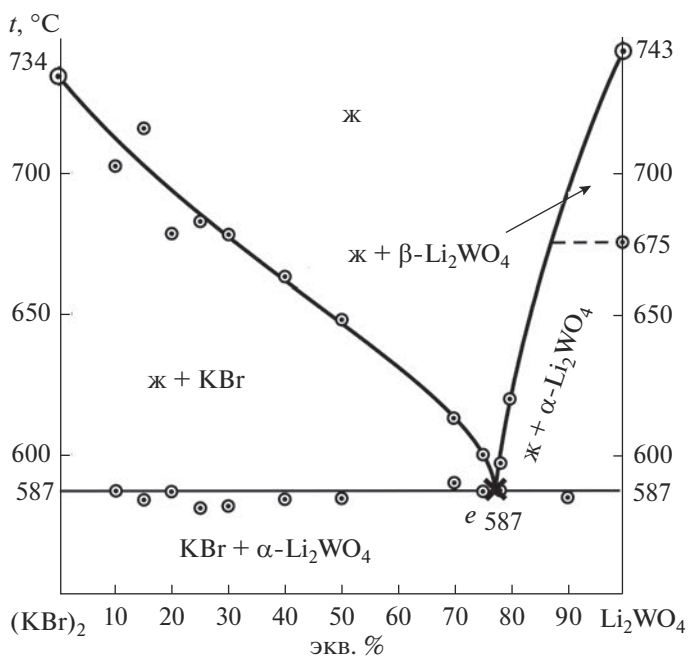


Рис. 5.  $T$ - $x$ -диаграмма сечения  $\text{KBr}-\text{Li}_2\text{WO}_4$  системы  $\text{Li}^+, \text{K}^+ \parallel \text{Br}^-, \text{WO}_4^{2-}$ .

(табл. 3), была определена удельная объемная энтальпия плавления  $\Delta_m H_V$  (МДж/м<sup>3</sup>) эвтектических смесей:

$$\Delta_m H_V = \Delta_m H^{\text{эксп}} \rho^{\text{ад}}, \text{ МДж/м}^3.$$

Значения удельной объемной энтальпии плавления  $\Delta_m H_V$  представлены в табл. 3.

После полного изучения системы  $\text{Li}^+, \text{K}^+ \parallel \text{Br}^-$ ,

$$(2) \quad \text{WO}_4^{2-} \text{ установлена топология ликвидуса, данная}$$

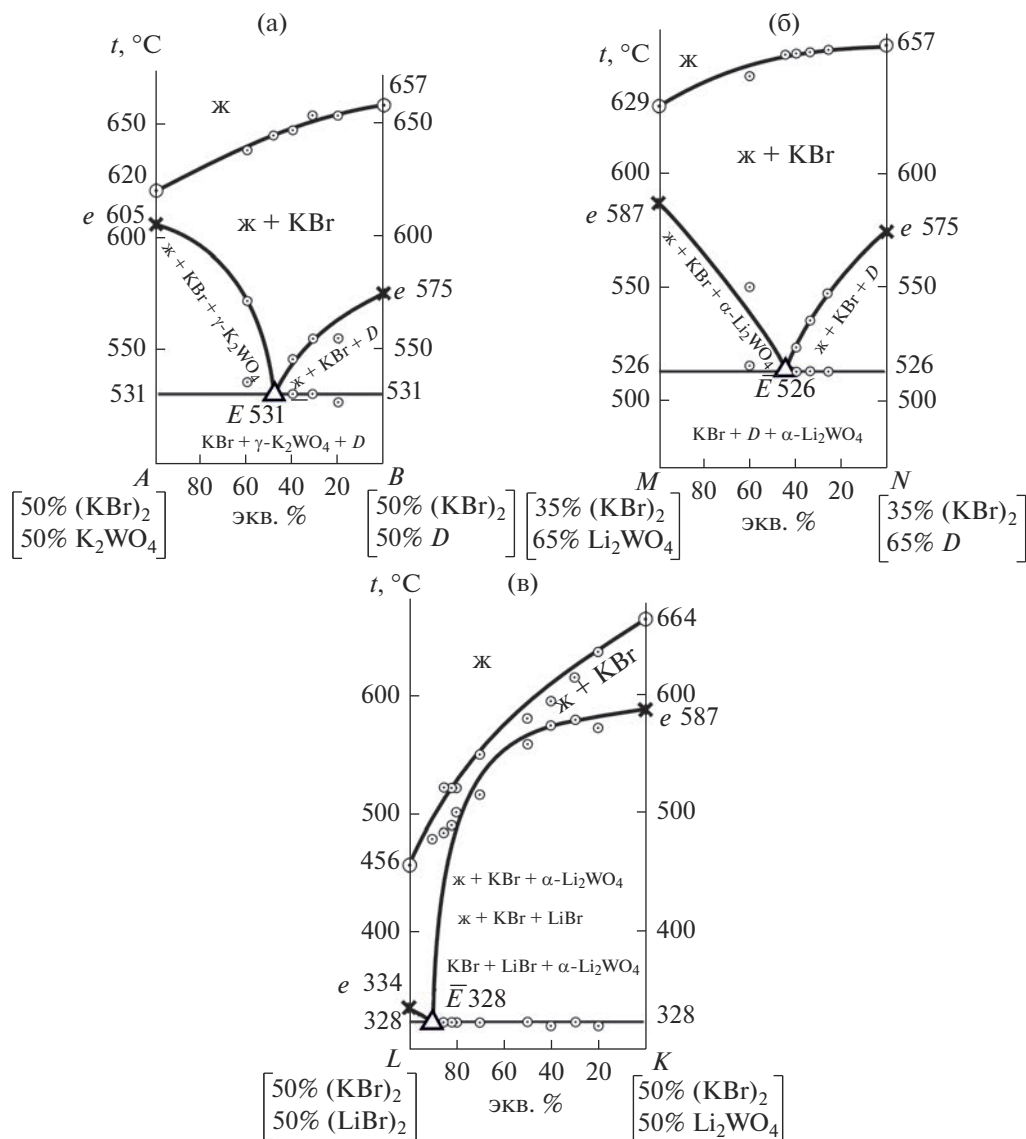


Рис. 6.  $T$ - $x$ -диаграммы сечений  $A-B$  (а),  $M-N$  (б),  $L-K$  (в).

Таблица 3. Теплофизические свойства эвтектических смесей

Эвтектика, $^{\circ}\text{C}$	Энтальпия плавления			$\rho_{\text{ад}^*}$ , $\text{кг}/\text{м}^3$	Удельная объемная энтальпия плавления, $\Delta_m H_V$ , $\text{МДж}/\text{м}^3$
	$\Delta_m H^{\text{эксп}}$ , $\text{кДж}/\text{кг}$	$\Delta_m H^{\text{эксп}}$ , $\text{кДж}/\text{моль}$	$\Delta_m H^{\text{ад}^*}$ , $\text{кДж}/\text{моль}$		
$e$ 587	131	27	27	3500	459
$e$ 575	91	22	29	3290	299
$E$ 328	200	21	21	3190	638
$E$ 526	85	21	28	3440	292
$E$ 531	88	22	29	3160	278

\* Рассчитано по аддитивности.

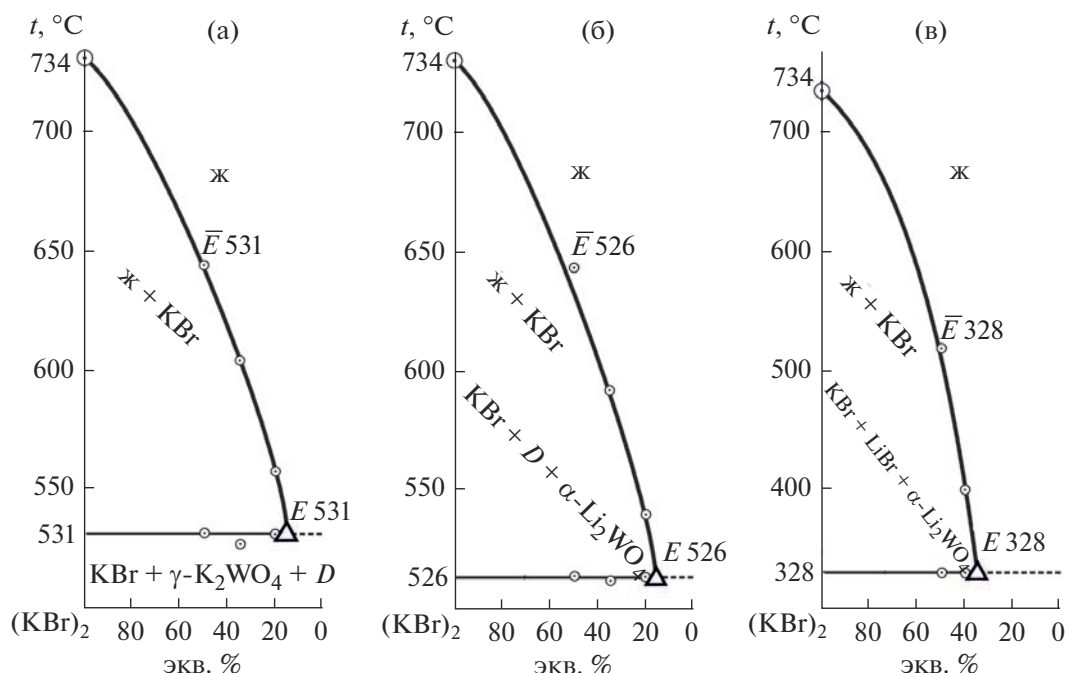


Рис. 7.  $T$ - $x$ -диаграммы сечений  $\text{KBr} \rightarrow \bar{E} 531 \rightarrow E 531$  (а),  $\text{KBr} \rightarrow \bar{E} 526 \rightarrow E 526$  (б),  $\text{KBr} \rightarrow \bar{E} 328 \rightarrow E 328$  (в) ( $\bar{E} 531$  – направление на эвтектику  $E 531$ ,  $\bar{E} 526$  – направление на эвтектику  $E 526$ ,  $\bar{E} 328$  – направление на эвтектику  $E 328$ ).

система является необратимо-взаимной. Диагональ  $\text{KBr}-\text{Li}_2\text{WO}_4$  и диагональ  $\text{KBr}-D(\text{Li}_2\text{WO}_4 \cdot \text{K}_2\text{WO}_4)$  являются стабильными и имеют квазидвойные эвтектики  $e 587$  и  $e 575$  соответственно. Несмотря на то что наиболее тугоплавким исходным компонентом является вольфрамат калия  $923^\circ\text{C}$ , наибольшую площадь квадрата составов занимает поле кристаллизации бромида калия  $734^\circ\text{C}$ .

Выявлен солевой состав с максимальной энтальпией плавления  $200$  кДж/кг и наибольшей удельной объемной энтальпией плавления  $638$  МДж/м<sup>3</sup> в системе, отвечающий низкоплавкой тройной эвтектике с температурой плавления  $E 328^\circ\text{C}$ , который можно рекомендовать в качестве теплоаккумулирующего.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании исследования трехкомпонентной взаимной системы  $\text{Li}^+, \text{K}^+ \parallel \text{Br}^-, \text{WO}_4^{2-}$  с помощью ДТА построены  $T$ - $x$ -фазовые диаграммы сечений внутри данной системы и определены характеристики квазидвойных и тройных эвтектик: состав, температура и энтальпия плавления.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончаров Е.Г., Афиногенов Ю.П., Кондрашин В.Ю., Ховин А.М. Теоретические основы неорганической химии. Воронеж: ВГУ, 2014. 589 с.
2. Денисова В.В., Таланова В.М. Общая и неорганическая химия / Под. ред. Денисова В.В., Таланова В.М. Ростов-на-Дону: Феникс, 2013. 573 с.
3. Molten Salts Chemistry and Technology / Eds. Marcelle Gaune-Escard, Geir Martin Haarberg. N.Y.: Wiley, 2014. 600 p. <https://doi.org/10.1002/9781118448847>
4. Делимарский Ю.К. Электрохимия ионных расплавов. М.: Металлургия, 1978. 248 с.
5. Третьяков Ю.Д., Путляев В.И. Введение в химию твердофазных материалов. М.: Наука, 2006. 400 с.
6. Васина Н.А., Грызлова Е.С., Шапошникова С.Г. Теплофизические свойства многокомпонентных солевых систем. М.: Химия, 1984. 112 с.
7. Химические источники тока. Справочник / Под ред. Коровина Н.В., Скундина А.М. М.: МЭИ, 2003. 740 с.
8. Делимарский Ю.К., Барчук Л.П. Прикладная химия ионных расплавов. Киев: Наук. думка, 1988. 192 с.
9. Егорцев Г.Е. Фазовые равновесия в системах из фторидов и бромидов щелочных металлов: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. Самара. 2007. 24 с.
10. Беляев И.Н. Диаграммы состояния систем с участием молибдатов и вольфраматов щелочных металлов и свинца // Журн. неорган. химии. 1961. Т. 6. Вып. 5. С. 1178–1188.

11. Кошкаров Ж.А., Луцык В.И., Мохосоев М.В., Воробьева В.П., Гаркушин И.К., Трунин А.С. Ликвидус системы  $\text{Li}$  ||  $\text{WO}_4$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{Cl}(\text{NO}_3)$  и  $\text{Li}$  ||  $\text{WO}_4$ ,  $\text{VO}_3$ ,  $\text{Cl}(\text{Br})$  // Журн. неорганической химии. 1987. Т. 32. Вып. 6. С. 1480–1483.
12. Кошкаров Ж.А., Луцык В.И., Мохосоев М.В., Гаркушин И.К., Трунин А.С. Ликвидус системы  $\text{K}_2\text{WO}_4$ – $\text{KF}$ – $\text{Kl}(\text{KBr})$  // Журн. неорганической химии. 1987. Т. 32. Вып. 10. С. 2541–2545.
13. Посытайко В.И., Васина Н.А., Грызлова Е.С. Конверсионный метод исследования многокомпонентных взаимных систем // Докл. АН СССР. 1975. Т. 23. № 5. С. 1191–1194.
14. Посытайко В.И. Методы исследования многокомпонентных систем. М.: Наука, 1978. 255 с.
15. Посытайко В.И., Тарасевич С.А., Трунин А.С. и др. Прогнозирование химического взаимодействия в системах из многих компонентов. М.: Наука, 1984. 215 с.
16. Гаркушин И.К., Сухаренко М.А. Древо фаз, прогноз кристаллизующихся фаз и описание химического взаимодействия в системе  $\text{MgO}$ – $\text{SiO}_2$ – $\text{TiO}_2$  // Неорганические материалы. 2022. Т. 58. № 11. С. 1231–1236. <https://doi.org/10.31857/S0002337X22110045>
17. Харченко А.В., Егорова Е.М., Гаркушин И.К., Бурчаков А.В., Яковлев В.М., Новиков В.А. Фазовый комплекс и химическое взаимодействие в трехкомпонентной взаимной системе  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Rb}^+$  ||  $\text{Br}^-$ ,  $\text{CrO}_4^{2-}$  // Неорганические материалы. 2022. Т. 58. № 11. С. 1219–1230. <https://doi.org/10.31857/S0002337X22110082>
18. Термические константы веществ: справочник / Под ред. Глушко В.П. М.: ВИНТИ, 1981. Вып. 10. Ч. 1. 300 с.
19. Термические константы веществ: справочник. Справочник / Под ред. Глушко В.П. М.: ВИНТИ, 1981. Вып. 10. Ч. 2. 441 с.
20. Свойства неорганических соединений. Справочник / Под ред. Ефимова А.И. и др. Л.: Химия, 1983. 392 с.
21. Brown E.M. Introduction to Thermal Analysis Techniques and Applications. N.Y.: Kluwer, 2004. 264 p. <https://doi.org/10.1007/0-306-48404-8>
22. Gabbott P. Principles and Application of Thermal Analysis. N.Y.: Blackwell, 2008. 480 p. <https://doi.org/10.1002/9780470697702>
23. Уэндландт У.У. Термические методы анализа; Пер. с англ. / под ред. Степанова В.А., Берштейна В.А. М.: Мир, 1978. 526 с.
24. Haines P.J. Principles of Thermal Analysis and Calorimetry. RSC paper-backs, Royal Society of Chemistry (Great Britain). 2002. 220 p. ISBN 0854046100, 9780854046102.
25. Гаркушин И.К., Фролов Е.И., Мощенский Ю.В. Термический анализ и калориметрия. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. 457 с.