

УДК 536.41:546.161'311

Термические свойства жидких и твердых смесей LiF–KF*

Р.А. Хайрулин, Р.Н. Абдуллаев, С.В. Станкус, А.Б. Мешалкин

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: abdullaev.rasul88@gmail.com

Методом просвечивания образцов узким пучком гамма-излучения измерена плотность жидких смесей фторидов лития и калия с содержанием 51,2 и 71,1 мол. % LiF, в интервале температур от ликвидуса до 1000–1190 К. Для смеси околоэвтектического состава (51,2 мол. % LiF) впервые непосредственно определены относительный скачок плотности при фазовом переходе «твердое тело — расплав» и плотность в твердом состоянии вблизи температуры плавления. На основе экспериментальных и литературных данных построены концентрационные зависимости мольного объема и объемного коэффициента теплового расширения для жидкой системы LiF–KF. Установлено, что полученные зависимости близки к концентрационным зависимостям соответствующих термических свойств для идеальных растворов.

Ключевые слова: гамма-метод, плотность, тепловое расширение, расплав, фторид лития, фторид калия.

Введение

Расплавленная смесь фторидов лития и калия эвтектического состава (с концентрацией $X \approx 50$ мол. % LiF) рассматривается как теплоноситель в некоторых проектах «жидкосолевых» ядерных реакторов [1–3]. Однако теплофизические свойства системы LiF–KF исследованы недостаточно подробно. Так, согласно работе [2], на 2018 год отсутствовали данные по вязкости и теплопроводности жидких смесей LiF–KF, в том числе расплава эвтектического состава. Проведенный анализ литературы показал, что и после 2018 г. исследования этих свойств, по-видимому, никем не проводились. Имеются также определенные расхождения литературных данных по координатам эвтектической точки на фазовой диаграмме системы LiF–KF. Авторы работы [4], проведя обзор и обобщение экспериментальных исследований по состоянию на 1986 г., пришли к выводу, что эвтектическая концентрация близка к эквимолярному составу, а температура плавления эвтектики лежит в интервале 487–493 °С (760–766 К). На основе анализа экспериментальных фазовых диаграмм и данных по избыточным термодинамическим функциям смешения они рассчитали и построили рекомендованную фазовую диаграмму системы LiF–KF.

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 121031800219-2).

Таблица 1

Сравнение литературных данных по термическим свойствам жидкой смеси фторидов лития и калия с содержанием 50 мол. % LiF

Источник	Уравнение для температурной зависимости плотности	$\rho_m(1000 \text{ К})$, кг/м ³	$\beta_m(1000 \text{ К})$, 10 ⁻⁵ К ⁻¹
[1]	$\rho_m(T) = 2460 - 0,68 (T - 273,15)$	1966	34,6
[3]	$\rho_m(T) = 2407 - 0,5362 T$	1871	28,7
[5]	$\rho_m(T) = 2595,5 - 0,85597 (T - 273,15)$	1973	43,4

Согласно этой диаграмме, эвтектическая концентрация составляет 51 мол. % LiF, а эвтектическая температура равна $492 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ($765 \pm 5 \text{ К}$).

Уравнения для температурной зависимости плотности расплава LiF–KF (50/50 мол. %), построенные на основании экспериментальных данных, приводятся в [1, 3, 5]. Согласно этим работам, плотность расплава линейно зависит от температуры:

$$\rho_m(T) = A - B(T - T_0), \quad (1)$$

где ρ_m — плотность жидкости, кг/м³; T — температура, К.

В табл. 1 приведены уравнения (1) из [1, 3, 5], а также рассчитанные по ним значения плотности и объемного коэффициента теплового расширения расплава $\beta_m = -(\partial\rho_m/\partial T)/\rho_m$ при 1000 К.

Как следует из табл. 1, разброс литературных данных по плотности расплава эквимолярного состава в районе 1000 К несколько превышает 5 % (при этом результаты [1, 5] согласуются в пределах 0,35 %), однако коэффициенты теплового расширения различаются более чем в 1,5 раза. Между тем надежные данные по тепловому расширению расплава необходимы для проведения теплогидравлических расчетов жидкосолевых реакторов при вынужденной и, особенно, естественной конвекции теплоносителя (например, в аварийных ситуациях, связанных с остановкой циркуляционных насосов) [2].

В литературе авторами не было найдено сведений об измерениях плотности твердых смесей LiF–KF и скачков плотности при фазовом переходе «твердое тело — расплав». В то же время известно, что плотность чистых фторидов лития и калия очень сильно уменьшается при плавлении (на 22,7–23,1 % [6, 7] и 14,7 % [6] соответственно). Очевидно, что смеси этих солей также должны испытывать значительные объемные изменения при переходе из твердого состояния в жидкое и обратно. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании конструкции охлаждающего контура и отработке режимов запуска и останова ядерного реактора. Для решения этих задач необходимы данные по межфазным изменениям плотности смесей LiF–KF.

Исходя из вышеизложенного, основной целью настоящей работы являлось получение надежных данных по плотности смеси фторидов лития и калия околоэвтектического состава в жидком и, частично, твердом состояниях. Кроме того, для оценки концентрационных зависимостей термических свойств жидкой системы вблизи эквимолярного состава были проведены измерения плотности расплава фторид лития — фторид калия с содержанием 71,1 мол. % LiF.

Методика и экспериментальная техника

Термические свойства смесей солей измерялись методом просвечивания образцов узким пучком гамма-излучения (гамма-методом). Экспериментальная установка и методика измерений подробно описаны в [8, 9]. В качестве источника гамма-квантов

(энергия 662 кэВ) использовалась ампула с изотопом цезий-137 активностью около 180 ГБк. Измерительные ячейки для образцов изготавливались из сплава НП2 [10]. Этот материал чрезвычайно устойчив к воздействию расплавленных фторидов щелочных металлов как минимум до температур ~ 1100 К [11]. Ячейка состояла из цилиндрического тигля высотой 60 мм, внутренним диаметром 40 мм и крышки с тонкостенной гильзой для хромель-алюмелевой термопары (тип К). Детали ячеек перед использованием отжигались в вакууме $\sim 10^{-4}$ мм рт. ст. при температуре ~ 1300 К. Градуировка термопары проверялась по точкам кристаллизации чистых олова, свинца, алюминия и магния. Отклонения измеренных температур затвердевания металлов от справочных данных не превышали 0,3–1,0 К.

В качестве исходных реактивов для приготовления образцов использовались фторид лития квалификации ОСЧ («особо чистый», чистота 99,9 мас. %) и дигидрат фторида калия ($\text{KF} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) квалификации ЧДА («чистый для анализа», чистота не менее 99 мас. %). Для удаления влаги и летучих примесей реактивы подвергались сушке под вакуумом при температуре 600–650 К. В ходе сушки контейнер с реактивом периодически взвешивался на аналитических весах. Сушка длилась до тех пор, пока масса реактива не переставала уменьшаться. Операции по приготовлению смесей солей и заполнению измерительных ячеек проводились в перчаточном боксе с высокочистым аргоном (99,992 об. %), оснащенный аппаратом электрической дуговой сварки и электронными аналитическими весами. Массы навесок LiF и KF, необходимые для расчета состава смесей, измерялись с погрешностью 2–3 мг. Соли помещались в измерительную ячейку, после чего крышка герметично приваривалась к тиглю. Фактическое содержание фторида лития в образцах составило $51,16 \pm 0,04$ мол. % и $71,08 \pm 0,04$ мол. %.

Перед экспериментами ячейка устанавливалась в печь гамма-плотномера, печь герметизировалась, вакуумировалась и заполнялась аргоном до давления 0,1 МПа. Образец плавился и выдерживался некоторое время с целью гомогенизации. Однородность расплава контролировалась его сканированием, т.е. измерением коэффициента ослабления пучка гамма-излучения в образце на различных высотах. В ходе нагревов и охлаждений определялась температурная зависимость плотности жидкой смеси, а для образца околоэвтектического состава, кроме того, в ходе охлаждения измерялись скачок плотности при фазовом переходе «твердое тело — жидкость» и плотность в твердом состоянии. Скорость нагревов/охлаждений составляла 1–3 К/мин в однофазных областях и не более 0,2 К/мин в области плавления/кристаллизации.

Плотность расплава ρ_m рассчитывается по формуле [8]

$$\rho_m(T) = \frac{\ln[J_0(T)/J(T)]}{\mu l_{293} [1 + \bar{\alpha}(T)(T - 293)]}, \quad (2)$$

которая вытекает из экспоненциального закона ослабления гамма-излучения. Здесь $J_0(T)$ и $J(T)$ — интенсивности пучка излучения, прошедшего через пустую и заполненную (с образцом) измерительную ячейку соответственно; l_{293} — длина ослабления излучения при 293 К (внутренний диаметр тигля с поправкой на диаметр пучка излучения); $\bar{\alpha}(T)$ — средний линейный коэффициент теплового расширения материала тигля (НП2); μ — массовый коэффициент ослабления излучения для смеси, который рассчитывается по правилу аддитивности через массовые концентрации и массовые коэффициенты ослабления излучения для лития, калия и фтора. При расчетах использовались экс-

периментальные значения μ для Li, K и F, определенные ранее [12–14]. Измерения теплового расширения сплава НП2 были проведены на dilatометре DIL-402C по методике из [15]. Следует отметить, что в этих измерениях использовался образец, вырезанный из того же слитка, из которого были изготовлены детали измерительных ячеек для гамма-экспериментов.

Величина относительного скачка плотности $\delta\rho_f$ при фазовом переходе рассчитывается из соотношения [8]

$$\delta\rho_f = \frac{\rho_c(T_f) - \rho_m(T_f)}{\rho_c(T_f)} = \frac{\ln[J_L / J_S]}{\ln[J_0(T_f) / J_S]}, \quad (3)$$

здесь T_f — температура плавления; J_L и J_S — интенсивности гамма-излучения, проходящего через тигель с жидким и твердым образцом при температуре плавления. Плотность твердого образца при температуре плавления $\rho_c(T_f)$ находится из плотности расплава при температуре плавления $\rho_m(T_f)$ и относительного скачка плотности $\delta\rho_f$, рассчитанных по (2) и (3).

Результаты и обсуждение

Результаты измерений плотности смесей солей представлены на рис. 1. Кристаллизация расплава, содержащего 71,1 мол. % LiF, в ходе охлаждения начиналась при температуре $T_L = 955,1 \pm 1,5$ К, протекала в широком температурном интервале и сопровождалась заметной макроскопической ликвацией. Сканирование затвердевшего образца

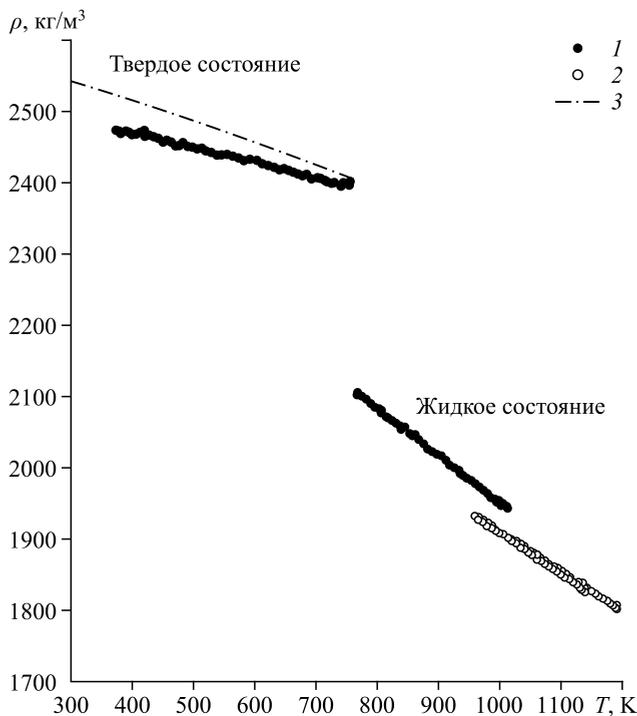


Рис. 1. Температурные зависимости плотности жидких и твердых смесей фторидов лития и калия.

1 — экспериментальные данные для смеси с содержанием 51,2 мол. % LiF;
 2 — то же для смеси с содержанием 71,1 мол. % LiF; 3 — температурная зависимость плотности твердой смеси с содержанием 51,2 мол. % LiF, рассчитанная в приближении идеального раствора (уравнение (5)).

пучком гамма-излучения выявило его сильную неоднородность, в связи с чем измерения плотности в твердом состоянии не проводились.

Кристаллизация расплава, содержащего 51,2 мол. % LiF, началась после небольшого (~ 3 К) переохлаждения. Максимальная температура саморазогрева образца после начала кристаллизации была принята за температуру ликвидуса $T_L = 762,7 \pm 1,5$ К. Измеренная величина T_L совпадает с температурой плавления эвтектики, приведенной в [4] (в пределах суммарных погрешностей). Затвердевание смеси протекало в достаточно узком (менее 10 К) температурном интервале. Сканирование образца сразу после окончания кристаллизации показало, что величина $\mu\rho$ на расстояниях 5–20 мм от дна тигля меняется не более чем на 0,3 %, т.е. твердая смесь в этом случае была достаточно однородной по составу и плотности. Все эти факты указывают на то, что состав данного образца действительно очень близок к эвтектическому. При дальнейшем охлаждении твердого образца началось его растрескивание, что привело к постепенному занижению измеряемых значений плотности по мере приближения к комнатной температуре. По мнению авторов, растрескивание связано с частичной адгезией образца к стенкам тигля и большой разницей между коэффициентами теплового расширения твердой смеси солей и сплава НП2. Так, согласно [16], средние линейные коэффициенты теплового расширения LiF и KF вблизи комнатной температуры превышают $30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а величина $\bar{\alpha}(293 \text{ K})$ для НП2, согласно нашим измерениям, равна $12,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Экспериментальные данные по плотности расплавов аппроксимировались линейными температурными зависимостями:

$$\rho_m(T) = A - B(T - T_L). \quad (4)$$

Значения коэффициентов $A = \rho_m(T_L)$ и $B = -\partial\rho_m/\partial T$ приведены в табл. 2. Согласно оценкам, ошибка расчета плотности расплавов по уравнениям (4) не превышает 0,4 %. Общая погрешность объемного коэффициента теплового расширения расплавов, включающая доверительные границы неучтенных систематических ошибок, составляет 2,5 %.

Величина относительного скачка плотности при фазовом переходе для смеси околоэвтектического состава, рассчитанная из сглаженных значений J_L и J_S с помощью соотношения (3), составила $\delta\rho_f = 12,1 \pm 0,2$ %. Плотность твердой смеси вблизи температуры ликвидуса $\rho_c(T_L)$ равна 2393 кг/м^3 . Погрешность величины $\rho_c(T_L)$, оцененная с учетом ошибок в плотности расплава и скачке плотности, а также с учетом неоднородности твердого образца составляет 0,6 %.

Как отмечено выше, плотность твердых смесей фторидов лития и калия ранее, по-видимому, не измерялась. Поэтому для оценки зависимости $\rho_c(T)$ для твердой смеси околоэвтектического состава в интервале температур от 293 К до точки плавления были использованы литературные данные по термическим свойствам компонентов и правило

Таблица 2
Коэффициенты аппроксимирующих уравнений (4)
для температурных зависимостей плотности жидких смесей
фторидов лития и калия

X , мол. % LiF	T_L , К	$\rho_m(T_L)$, кг/м ³	$-\partial\rho_m/\partial T$, кг/(м ³ ·К)	Температурный интервал, К
51,2	762,7	2104,6	0,6639	760–1010
71,1	955,1	1930,7	0,5613	955–1190

аддитивности для удельных объемов, справедливое для идеальных растворов. Согласно различным источникам, цитируемым в [17], так называемая «рентгеновская» плотность LiF при 293–298 К, рассчитанная из параметров кристаллической решетки, лежит в интервале 2637–2646 кг/м³. Разброс литературных данных по плотности фторида калия при комнатной температуре более значителен. Так, согласно [18], величина $\rho(293\text{ К})$ для KF равна 2480 кг/м³. При этом рентгеновская плотность при комнатной температуре составляет от 2505 до 2527 кг/м³ [17]. Для расчетов были взяты значения плотности LiF и KF при 293 К, равные 2640 и 2500 кг/м³ соответственно. Рекомендованные данные по относительному линейному тепловому расширению $\delta L(T) = \Delta L(T)/L(293\text{ К})$ твердых фторидов лития и калия были взяты из справочного издания [16]:

$$\delta L_{\text{LiF}}(T) = -1,035 \cdot 10^{-2} + 3,424 \cdot 10^{-5} T + 1,733 \cdot 10^{-9} T^2 + 6,745 \cdot 10^{-12} T^3$$

(интервал температур 293–1100 К);

$$\delta L_{\text{KF}}(T) = -0,787 \cdot 10^{-2} + 2,330 \cdot 10^{-5} T + 9,810 \cdot 10^{-9} T^2 + 8,024 \cdot 10^{-12} T^3$$

(интервал температур 150–600 К).

Температурные зависимости плотности твердых фторидов лития и калия рассчитывались по формуле

$$\rho_{\text{LiF(KF)}}(T) = \rho_{\text{LiF(KF)}}(293\text{ К})/[1 + \delta L_{\text{LiF(KF)}}(T)]^3.$$

И наконец температурная зависимость плотности твердой смеси солей находилась в приближении идеального раствора:

$$\rho_c(T) = [C/\rho_{\text{LiF}}(T) + (1 - C)/\rho_{\text{KF}}(T)]^{-1}, \quad (5)$$

где $C = 0,3187$ — массовая доля фторида лития в смеси околоэвтектического состава.

Отметим, что при расчетах пришлось экстраполировать рекомендованную зависимость $\delta L_{\text{KF}}(T)$ из [16] более чем на 150 К. Согласно оценкам, погрешность расчета плотности по (5) составляет 0,8–1,0 % (даже без учета погрешностей рекомендованных данных по тепловому расширению компонентов [16], погрешностей экстраполяции зависимости $\delta L_{\text{KF}}(T)$ к эвтектической температуре и использования приближения идеального раствора). Тем не менее расчетная величина плотности твердой смеси околоэвтектического состава при температуре плавления (2401 кг/м³) оказалась выше измеренной плотности всего лишь на 0,33 %. По мере понижения температуры, как и ожидалось, разность между расчетной и измеренной зависимостями $\rho_c(T)$ увеличивается (см. рис. 1). Выполненные оценки, с одной стороны, косвенно подтверждают надежность полученных нами данных по плотности жидкой смеси LiF–KF околоэвтектического состава, скачку плотности при фазовом переходе и плотности твердой смеси вблизи точки плавления, а с другой стороны, позволяют утверждать, что приближение идеального раствора дает возможность с достаточно высокой точностью рассчитывать термические свойства твердых смесей фторидов щелочных металлов в широких интервалах температур (конечно, при условии надежности данных по термическим свойствам компонентов).

На рис. 2 представлены экспериментальные и литературные данные по мольным объемам V_m жидких фторида лития, фторида калия и их смесей при 1150 К. Следует отметить хорошее согласие литературных данных по мольным объемам компонентов системы LiF–KF (они показаны в увеличенном масштабе на вставках). Так, результаты [5, 19, 20] для расплава фторида лития согласуются в пределах 0,4 %, а расхождение значений V_m из работ [5] и [19] для расплава фторида калия менее 0,1 %. Линейная концент-

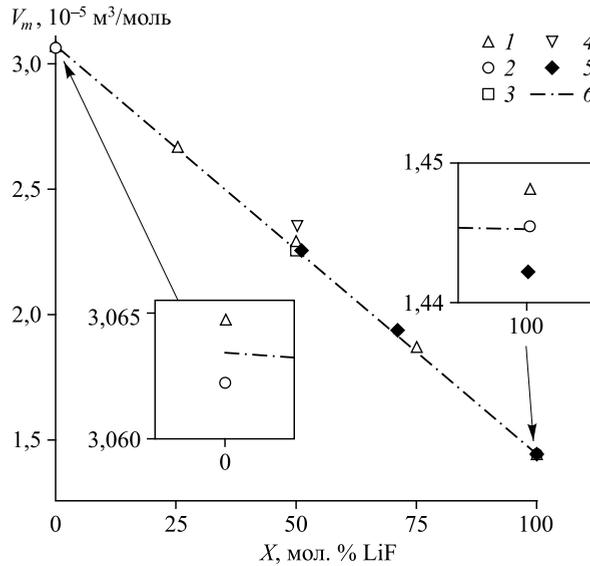


Рис. 2. Концентрационная зависимость мольного объема жидкой системы LiF–KF при 1150 К.
 1–4 — данные работ [5, 19, 1, 3] соответственно,
 5 — результаты настоящей работы для смесей и данные [20] для фторида лития, 6 — зависимость $V_m^{id}(X)$ для идеальных растворов.

рационная зависимость $V_m^{id}(X)$ (линия 6 на рис. 2) построена по усредненным литературным данным о мольных объемах компонентов. Значения V_m для жидких смесей из [1, 5] и настоящей работы отклоняются от этой зависимости не более чем на 1,1 %, и лишь отклонение величины V_m из [3] для расплава эквимолярного состава составляет чуть более чем 4 %. Таким образом, можно сделать вывод, что поведение мольного объема жидкой системы LiF–KF с высокой степенью точности подчиняется закону для идеальных растворов, во всяком случае, при температурах от ~ 1000 до ~ 1200 К.

На рис. 3 представлены экспериментальные и литературные данные по объемным коэффициентам теплового расширения β_m жидких фторида лития, фторида калия и их смесей при 1150 К. Как видно, разброс результатов по тепловому расширению расплавов более существенный по сравнению с разбросом данных по мольному объему. С учетом этого вся совокупность данных аппроксимировалась линейной концентрационной зависимостью (линия 6 на рис. 3). Наиболее сильные отклонения от этой зависимости демонстрируют значения β_m из [19] (для фторида калия) и из [3, 5] (для смеси эквимолярного состава). По-видимому, эти данные отягощены большими погрешностями. Если исходить из предположения, что поведение термических свойств жидкой системы LiF–KF подчиняется законам идеального раствора в широком интервале температур, то и в этом случае данные [5] по тепловому расширению жидкой смеси с содержанием 50 мол. % LiF являются ошибочными. Для идеальных растворов изотермы $\beta_m^{id}(X)$ описываются уравнением

$$\beta_m^{id}(X) = \frac{X\beta_m^{\text{LiF}}V_m^{\text{LiF}} + (100-X)\beta_m^{\text{KF}}V_m^{\text{KF}}}{XV_m^{\text{LiF}} + (100-X)V_m^{\text{KF}}} \quad (6)$$

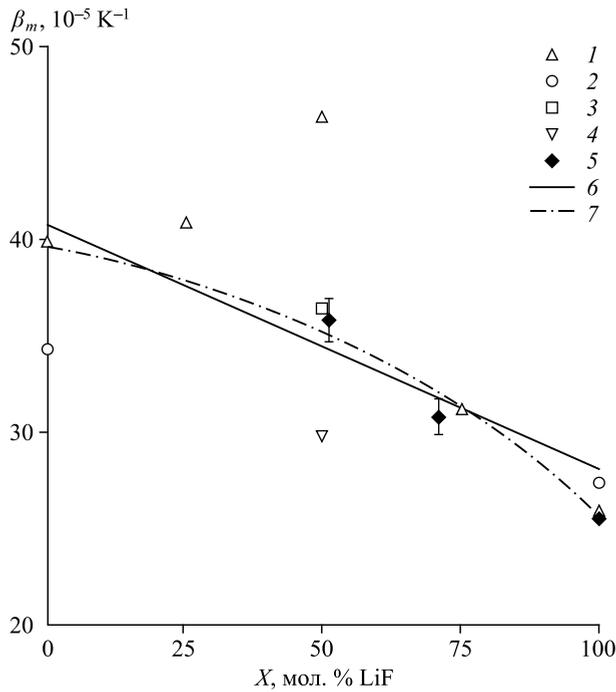


Рис. 3. Концентрационная зависимость
 объемного коэффициента теплового расширения
 жидкой системы LiF–KF при 1150 К.

1–4 — данные работ [5, 19, 1, 3] соответственно,
 5 — результаты настоящей работы для смесей и данные [20]
 для фторида лития, 6 — линейная аппроксимация данных,
 7 — зависимость $\beta_m^{id}(X)$ для идеальных растворов
 (уравнение (6)).

и не могут иметь максимумов или минимумов. Зависимость (6) (линия 7 на рис. 3) построена по данным о термических свойствах расплавов KF и LiF из работ [5, 20]. Результаты [1] и настоящей работы, а также данные [5] (для смеси с содержанием 75 мол. % LiF) хорошо согласуются с зависимостью $\beta_m^{id}(X)$, что косвенно подтверждает их надежность.

В целом проведенный анализ позволяет сделать вывод, что наиболее надежные данные по термическим свойствам компонентов и смесей жидкой системы LiF–KF приводятся в работе [5] для фторида лития, фторида калия и их смеси с содержанием 75 мол. % LiF, в [1] для смеси эквимолярного состава и в [20] для фторида лития, а также в настоящей работе для смесей с содержанием 51,2 и 71,1 мол. % LiF. Результаты этих работ можно использовать для расчетов плотности и теплового расширения расплавов LiF–KF в широких интервалах концентраций и температур.

Список литературы

1. Williams D.F., Toth L.M., Clarno K.T. Assessment of candidate molten salt coolants for the advanced high temperature reactor (AHTR) // Oak Ridge Nat. Lab. Rep. ORNL/TM-2006/12. 2006. 69 p.
2. McMurray J., Besmann T., Jerden J. et al. Multi-physics simulations for molten salt reactor evaluation: Chemistry modeling and database development // Oak Ridge Nat. Lab. Rep. ORNL/SPR-2018/864. 2018. 91 p.
3. Samuel D. Molten salt coolants for high temperature reactors // IAEA Internship Rep. 2009. 59 p.
4. Sangster J., Pelton A.D. Phase diagrams and thermodynamic properties of the 70 binary alkali halide systems having common ions // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1987. Vol. 16, No. 3. P. 509–561.

5. Chrenková M., Daněk V., Silný A. Density of the system LiF–KF–K₂NbF₇ // Chem. Papers. 2000. Vol. 54, No. 5. P. 272–276.
6. Убеллоде А.Р. Расплавленное состояние вещества. Пер. с англ. М.: Metallurgy, 1982. 376 с.
7. Станкус С.В., Хайруллин Р.А., Тягельский П.В. Изменение плотности LiF, YF₃ и LiYF₄ при плавлении // Неорганические материалы. 1996. Т. 32, № 2. С. 234–237.
8. Станкус С.В., Хайруллин Р.А., Попель П.С. Методика экспериментального определения плотности твердых и жидких материалов гамма-методом. Методика ГСССД МЭ 206–2013. М.: Стандартинформ, 2013. 54 с.
9. Станкус С.В., Хайруллин Р.А. Измерение термических свойств платины в интервале температур 293–2300 К методом проникающего излучения // Теплофизика высоких температур. 1992. Т. 30, № 3. С. 487–494.
10. ГОСТ 492–2006. Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые, обрабатываемые давлением. Марки. Взамен ГОСТ 492–73; Введ. 01.01.2008. М.: Стандартинформ, 2011. 14 с.
11. Суренков А.И., Игнатьев В.В., Трунькин И.Н., Пресняков М.Ю., Углов В.С. Исследование коррозионной стойкости никель-молибденовых сплавов в эвтектике LiF–NaF–KF // Атомная энергия. 2020. Т. 129, № 3. С. 142–147.
12. Khairulin R.A., Abdullaev R.N., Stankus S.V., Agazhanov A.S., Savchenko I.V. Volumetric properties of lithium–lead melts // Intern J. Thermophys. 2017. Vol. 38, No. 2. P. 23–1–23–10.
13. Хайруллин Р.А., Абдуллаев Р.Н., Станкус С.В. Растворимость калия, рубидия и цезия в жидком литии при высоких температурах // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28, № 1. С. 157–161.
14. Станкус С.В., Хайруллин Р.А., Багинский А.В. Термодинамические и переносные свойства гексафторбензола и перфтортриэтиламина в жидком состоянии // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8, № 2. С. 317–327.
15. Abdullaev R.N., Kozlovskii Yu.M., Khairulin R.A., Stankus S.V. Density and thermal expansion of high purity nickel over the temperature range from 150 K to 2030 K // Intern J. Thermophys. 2015. Vol. 36, No. 4. P. 603–619.
16. Touloukian Y.S., Kirby R.K., Taylor E.R., Lee T.Y.R. Thermophysical properties of matter. The TPRC data series. Vol. 13. Thermal expansion – nonmetallic solids. N. Y., Washington: IFI/Plenum, 1977. 1658 p.
17. Springer Materials: база данных. Crystal structure data of inorganic compounds. Simple fluorides and their solid solutions (Key elements: F, Cl, Br, I). URL: https://materials.springer.com/lb/docs/sm_lbs_978-3-540-38373-4_2 (дата обращения: 12.05.2023).
18. Han Q., Li H.Y. Potassium fluoride // Wiley Online Library: Encyclopedia of Reagents for Organic Synthesis. 2001. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/047084289X.rp214> (дата обращения: 12.05.2023).
19. Janz G.J., Dampier F.W., Lakshminarayanan G.R., Lorenz P.K., Tomkins R.P.T. Molten salts: volume 1, electrical conductance, density, and viscosity data. Washington: US National Bureau of Standards, 1968. 139 p.
20. Абдуллаев Р.Н., Хайруллин Р.А., Станкус С.В. Плотность и тепловое расширение жидких солей LiF и LiF–NaF // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 1. С. 141–145.

*Статья поступила в редакцию 17 мая 2023 г.,
после доработки — 31 мая 2023 г.,
принята к публикации 16 июня 2023 г.*