

УДК 544.31

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ РАСПЛАВОВ FLiNaK И FLiNaK–CeF₃© 2023 г. Е. В. Николаева^а, *, А. Л. Бове^а, И. Д. Закирьянова^а^аИнститут высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: e.nikolaeva@ihte.uran.ru

Поступила в редакцию 30.04.2023 г.

После доработки 01.06.2023 г.

Принята к публикации 15.06.2023 г.

Эвтектическая смесь LiF–NaF–KF (FLiNaK) является перспективной, как соль-носитель для жидкосолевых реакторов. Фторид церия CeF₃ может рассматриваться, как имитатор фторида плутония PuF₃. В работе исследована температурная зависимость удельной электропроводности расплавленной тройной эвтектики LiF–KF–NaF, содержащей от 0 до 25 мол. % фторида церия в интервале температур 480–777°C. Смеси FLiNaK–CeF₃, готовили непосредственно в экспериментальной ячейке, сбрасывая необходимое количество CeF₃ в расплав и выдерживая смеси заданного состава в течение 12 ч при температурах, превышающих температуры ликвидуса исследуемых композиций. Сопротивление электролита определяли по годографам импеданса, которые снимали с помощью импедансометра Z-1500J. Использовали двухэлектродную ячейку с Pt электродами. Анализ имеющихся в литературе экспериментальных значений электропроводности двойных и тройных фторидных расплавов KF–LiF; KF–NaF; LiF–NaF–KF показывает, что наши данные по электропроводности эвтектической смеси LiF–NaF–KF (FLiNaK) соответствуют общей тенденции изменения электропроводности с увеличением концентрации KF в расплаве. Показано значительное уменьшение удельной электропроводности расплавленной системы и небольшое увеличение энергии активации электропроводности с повышением концентрации фторида церия. Температурные зависимости удельной электропроводности расплавленной системы были аппроксимированы полиномами второго порядка.

Образование в расплаве комплексного иона CeF₆^{3–} подтверждено спектральными исследованиями. Были зафиксированы спектры КРС расплавленных смесей FLiNaK и FLiNaK–CeF₃, содержащих 8 и 15 мол. % фторида церия. При увеличении концентрации CeF₃ в расплаве увеличивается количество комплексных ионов CeF₆^{3–}, что приводит к росту интенсивности наблюдаемых колебательных полос.

Ключевые слова: электропроводность, импеданс, FLiNaK, фторид церия, КР-спектры

DOI: 10.31857/S0235010623060051, **EDN:** DIVBAC

ВВЕДЕНИЕ

Возможности электрохимического извлечения редких и химически активных металлов и сплавов из их оксидов, растворенных в системах фторидных солей, были продемонстрированы во многих работах [1–4]. Знание физических свойств фторидных электролитов, таких как электропроводность и плотность, обеспечивает основу для проектирования электролизеров.

В работе [3] был предложен малолетучий электролит на основе фторидов лития и бария. Эта работа положила начало широкой исследовательской программе Горного Бюро США (U.S. Bureau of Mines), направленной на разработку электролитического способа получения РЗМ из фторидных расплавов. Проводились измерения электропроводности и плотности бинарных смесей фторидов лития, натрия или калия, а также бинарных смесей, содержащих один из этих фторидов и CaF_2 , YF_3 , LaF_3 , CeF_3 , SmF_3 , ThF_4 или UF_4 . Кроме того, аналогичные измерения проводились на тройных смесях, LiF-NaF-KF , LiF-NaF-YF_3 или LiF-NaF-UF_4 .

Большой объем работ по изучению физико-химических свойств расплавов на основе фторидов щелочных и щелочноземельных металлов с добавкой фторидов РЗМ был выполнен в "АО ГИРЕДМЕТ". В широком диапазоне концентраций были изучены электропроводности расплавов LiF-LaF_3 , LiF-NdF_3 [4].

В исследованиях Ок-Риджской национальной лаборатории (ORNL) США представлены данные о физических свойствах 94 смесей расплавленных солей фторидов, которые рассматривались для использования в качестве высокотемпературного жидкого топлива и охлаждающих жидкостей реакторов [5].

Эвтектическая смесь $0.465\text{LiF}-0.115\text{NaF}-0.42\text{KF}$ (FLiNaK) в настоящее время рассматривается как соль-носитель для жидкосолевых реакторов. Известно, что фториды лантаноидов CeF_3 и NdF_3 могут рассматриваться, как имитаторы PuF_3 и AmF_3 [6]. В литературе имеется только одна работа, в которой содержатся сведения об электропроводности расплава FLiNaK [4]. Данные об электропроводности его смесей со фторидами РЗМ отсутствуют. Поэтому в настоящей работе была поставлена задача измерить электропроводность расплавов FLiNaK и его смесей с CeF_3 .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Подготовка и аттестация реактивов

Эвтектическая смесь LiF-NaF-KF была приготовлена из индивидуальных солей: фторида лития LiF ("ч. д. а.", "АО РЕАХИМ", Екатеринбург, РФ), фторида натрия NaF ("ч. д. а.", ООО "Галоген", Пермь, РФ), кислого фторида калия KF-HF ("ч. д. а.", "АО РЕАХИМ", Екатеринбург, РФ).

Порошки солей предварительно сушили при 300°C на воздухе. Расчетные количества солей тщательно перемешивали и помещали в тигель с крышкой из стеклоуглерода. Тигель опускали на дно высокой пробирки из нержавеющей стали, которую накрывали крышкой. Нижнюю часть пробирки постепенно нагревали в печи сопротивления со скоростью 2.5 град/мин. Выделяющийся при термическом разложении кислого фторида калия HF подавлял гидролиз солей, способствуя уменьшению кислородных примесей в конечном продукте [7]. После прекращения разложения KF-HF смесь быстро нагревали до 750°C и после выдержки в течение 2 ч охлаждали. При 400°C закрытый стеклоуглеродный тигель перемещали в шлюз аргонового перчаточного бокса и охлаждали до комнатной температуры под вакуумом.

Дополнительную очистку полученной эвтектической смеси LiF-NaF-KF (FLiNaK) проводили методом направленной кристаллизации. Все работы с FLiNaK проводили в перчаточном аргоновом боксе (содержание влаги и кислорода не превышало 1 ppm). Полученную фторидную композицию аттестовали методом синхронного термического анализа (STA 449C Jupiter, NETZSCH, Германия). Температура и энтальпия плавления смеси (460°C и 414 Дж/г соответственно) согласуются со справочными данными [8].

Для аттестации CeF_3 (99.9%, "х. ч.", CAS 7758-88-5, CHIMKRAFT Company, РФ) использовали методы КРС спектроскопии (Raman microscope spectrometer U1000, Renishaw, Великобритания) и РФА (CuK_α -излучение, дифрактометр Rigaku MiniFlex 600, Япония). Известно, что фторид церия при нормальных условиях имеет кристалличе-

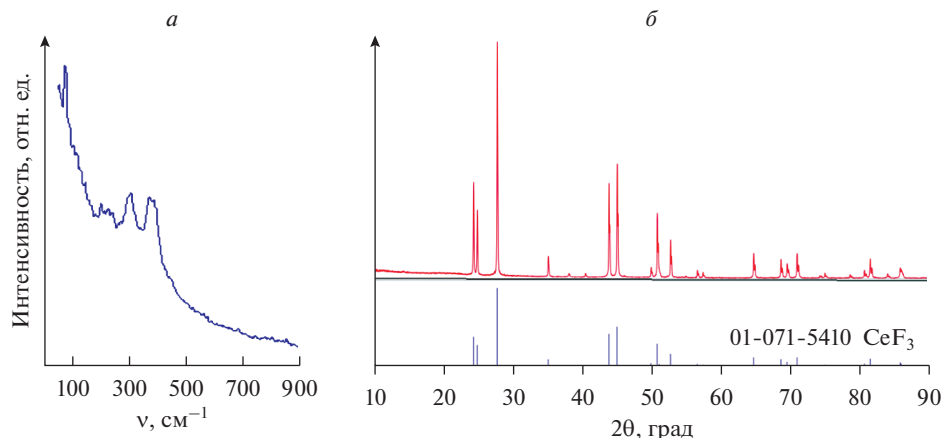


Рис. 1. КРС спектр (а) и РФА (б) трифторида церия.

скую решетку симметрии D_{3d}^4 , содержащую шесть формульных единиц в элементарной ячейке. Правила отбора определяют 17 активных мод ($5A_{1g} + 12E_g$) в спектре КРС [9]. Некоторые из них, по-видимому, имеют слабую интенсивность и не зафиксированы [10]. В соответствии с результатами работы [9] в зарегистрированном спектре CeF_3 (рис. 1а) колебательные полосы при 396, 240, 295, 314 cm^{-1} отнесены к колебательным модам A_{1g} , а полосы при 77, 145, 203, 225, 306, 319, 386 cm^{-1} — к модам E_g . Колебательных полос, относящихся к другим фазам, а также полос адсорбированной воды не обнаружено. РФА используемого реактива CeF_3 также подтвердил его однофазность (рис. 1б).

Смеси FLiNaK– CeF_3 , содержащие до 25 мол. % фторида церия, готовили непосредственно в экспериментальной ячейке, сбрасывая необходимое количество CeF_3 в расплав и выдерживая смесь заданного состава в течение 12 ч при температурах, превышающих температуры ликвидуса исследуемых композиций [11].

Методика измерения электропроводности расплава

Сопротивление электролита определяли по годографам импеданса, которые снимали с помощью импедансометра Z-1500J. Использовали двухэлектродную ячейку с Pt электродами.

В расплав, находящийся в стеклоглеродном тигле, погружали два параллельных платиновых электрода диаметром 1.2 мм. Глубина погружения электродов в расплав оставалась постоянной в течение всего опыта за счет того, что они на высоте примерно 1.5 см от концов были жестко закреплены в планке, изготовленной из нитрида бора. Схема экспериментальной ячейки и методика проведения эксперимента подробно описаны в [12]. При работе с химически агрессивными фторидными расплавами в качестве контейнера использовали тигель из стеклоглерода, а стенки кварцевой ячейки дополнительно защищали никелевой фольгой, в качестве сбрасывателя использовали трубку из нержавеющей стали.

Удельную электропроводность рассчитывали по формуле:

$$\kappa = K/R,$$

где K — константа ячейки, cm^{-1} ; R — омическое сопротивление электролита, Ом.

Таблица 1. Коэффициенты уравнения температурной зависимости удельной электропроводности системы FLiNaK–CeF₃

CeF ₃ , мол. %	Интервал температур, °C	$-A$, См/см	B_1 , См/см · град · 10 ²	B_2 , См/см · град ² · 10 ⁶	$\Delta\kappa$, См · см ⁻¹	κ при 750°C, См/см	κ/κ_0 при 750°C
0	480–777	4.40	1.5402	7.4	0.01	2.99	1.00
5	487–782	4.04	1.4181	7.3	0.01	2.49	0.83
10	513–780	2.99	1.0206	4.3	0.01	2.25	0.75
15	541–790	2.78	0.8775	3.1	0.01	2.054	0.69
20	586–815	1.87	0.5834	1.0	0.01	1.94	0.65
25	629–820	1.71	0.5238	0.8	0.01	1.77	0.59

Константу ячейки определяли в интервале температур 432–839°C по значениям электропроводности расплава эвтектики LiCl–KCl. Электропроводность этого электролита изучена в интервале температур 411–947°C. [13]. Калибровку ячейки по расплаву с известной электропроводностью проводили в тех же условиях, что и в опытах при определении электрического сопротивления исследуемых расплавов, т.е. при той же глубине погружения в расплав электродов с тем же межэлектродным расстоянием.

Методика регистрации спектров КРС

Спектры КРС расплавленных смесей FLiNaK и FLiNaK–CeF₃, содержащих 8 и 15 мол. % фторида церия, регистрировали с помощью оптоволоконного спектрометрического комплекса Ava-Raman (Avantes, Нидерланды), включающего в себя источник монохроматического лазерного излучения мощностью 50 мВт, $\lambda = 532$ нм (180-градусная схема рассеяния) и охлаждаемый CCD-детектор. В качестве контейнера для химически агрессивных фторидных расплавов использовали графитовые тигли высотой 15 и внутренним диаметром 10 мм. Тигель с образцом помещали в высокотемпературную оптическую приставку, выполненную в виде дюралюминиевого блока с вертикальным нихромовым нагревателем и верхним торцевым кварцевым окном для пропускания падающего и рассеянного света. Устройство оптической приставки подробно описано в [11]. Образцы нагревали в инертной атмосфере (Ar) до температур, превышающих температуры ликвидуса исследованных композиций. Спектры КРС регистрировали в диапазоне 150–900 см⁻¹, время регистрации одного спектра не превышало 10 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Удельная электропроводность расплава FLiNaK

Температурная зависимость удельной электропроводности расплава FLiNaK (рис. 2) была исследована в интервале температур 480–777°C. Экспериментальные данные были аппроксимированы полиномом второго порядка $\kappa = A + B_1t + B_2t^2$ (табл. 1). В литературе есть одна работа [5], в которой приводятся данные об удельной электропроводности расплава FLiNaK. Эти данные были получены в Ок-Риджской национальной лаборатории (ORNL) США в 1954 году.

Значения удельной электропроводности расплава FLiNaK, полученные нами в несколько раз превышают значения, сообщаемые в работе [5].

Анализ имеющихся в литературе [1, 14] экспериментальных значений электропроводности двойных и тройных фторидных расплавов KF–LiF; KF–NaF; LiF–NaF–KF показывает, что наши данные соответствуют общей тенденции изменения электропроводности с увеличением концентрации KF в расплаве.

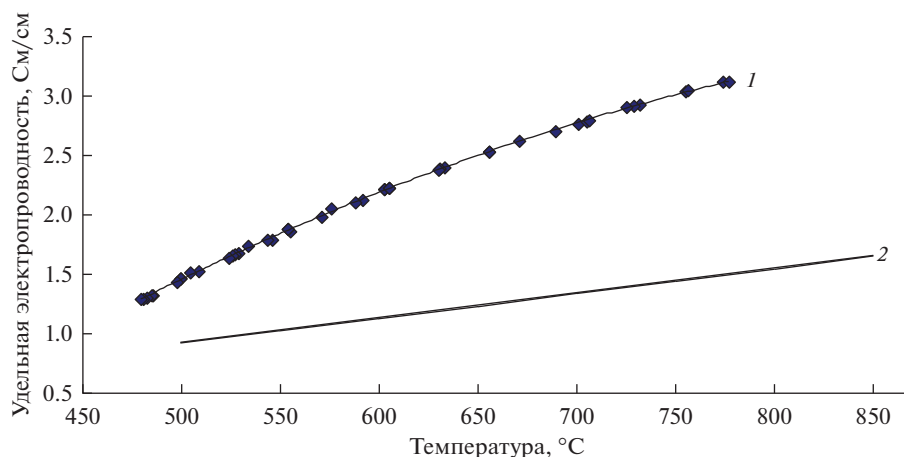


Рис. 2. Температурная зависимость удельной электропроводности расплава FLiNaK. 1 – эксперимент; 2 – данные [4].

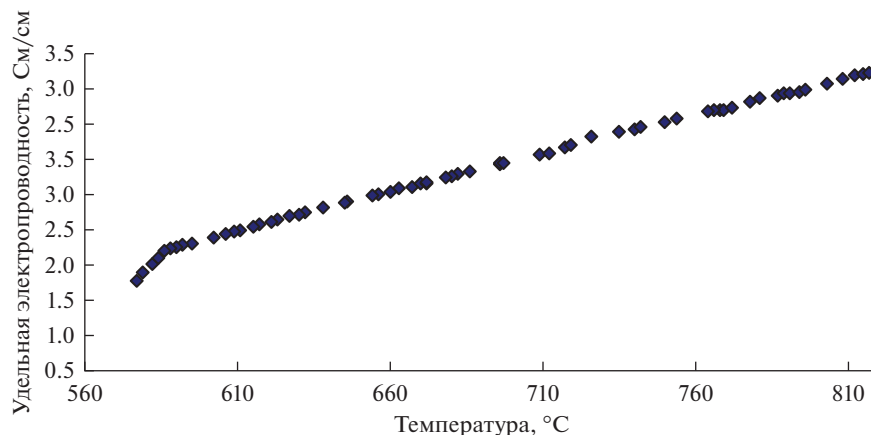


Рис. 3. Температурная зависимость удельной электропроводности расплава FLiNaK–CeF₃ (20 мол. %).

Удельная электропроводность расплава FLiNaK–CeF₃

На рис. 3 приведена типичная температурная зависимость удельной электропроводности для системы FLiNaK–CeF₃.

Как видно из этого рисунка, при 586°C наблюдается изменение наклона кривой температурной зависимости электропроводности, которое можно связать с появлением в расплаве твердой фазы CeF₃. Согласно литературным данным [11] эта температура соответствует температуре ликвидуса рассматриваемой системы FLiNaK–CeF₃ (20 мол. %). В дальнейшем рассматривали только участки кривых температурных зависимостей, соответствующие гомогенным системам (выше их температур ликвидуса).

На рис. 4 приведены температурные зависимости удельной электропроводности всех изученных смесей FLiNaK–CeF₃. Они были аппроксимированы полиномами второго порядка $\kappa = A + B_1t + B_2t^2$ или линейными уравнениями $\kappa = A + B_1t$. Коэффициенты этих зависимостей представлены в табл. 1.

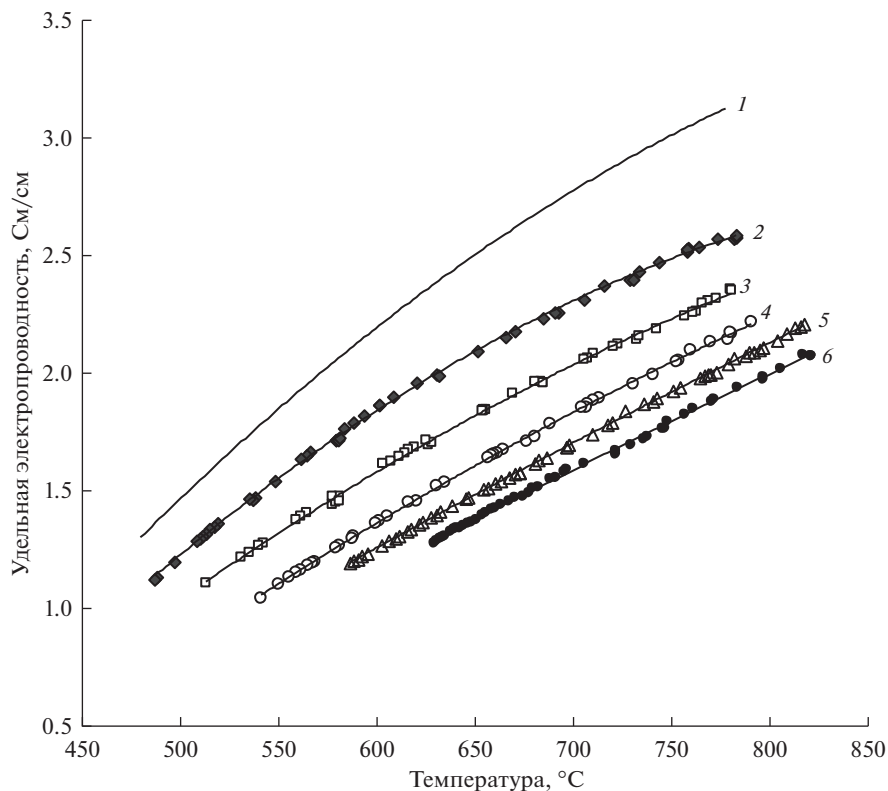


Рис. 4. Температурные зависимости удельной электропроводности системы FLiNaK–CeF₃ при концентрации фторида церия: 0 (1); 5 (2); 10 (3); 15 (4); 20 (5); 25 мол. % (6).

На рис. 5 приведена изотерма (750°C) относительного изменения удельной электропроводности системы FLiNaK–CeF₃, содержащей от 0 до 25 мол. % CeF₃. Видно, что удельная электропроводность плавно снижается при увеличении концентрации фторида церия, отклоняясь от аддитивных величин в сторону меньших значений. Так, при 750°C добавка 5 мол. % CeF₃ уменьшает удельную электропроводность системы на 17%, а добавка 25 мол. % CeF₃ соответственно на 41%.

В Аррениусовских координатах значения удельной электропроводности в небольшом интервале температур (около 200°C) могут быть аппроксимированы линейным уравнением $\ln(\kappa) = a + b/T$. Здесь κ — удельная электропроводность, См/см; a и b — константы; T — абсолютная температура. В этом случае $R(-b) = E_A$ — энергия активации электропроводности. Энергия активации, рассчитанная непосредственно на основе экспериментальных данных, представляет собой эффективное значение энергий активации всех возможных механизмов переноса заряда ионами солевого расплава. Увеличение энергии активации указывает на упрочнение связей между частицами. Энергия активации электропроводности расплавов FLiNaK–CeF₃ представлена в табл. 2 в зависимости от концентрации в расплаве фторида церия. Можно отметить небольшой рост энергии активации с увеличением концентрации CeF₃.

Согласно теоретическим расчетам [15, 16] практически для всех присутствующих в системе ионов, за исключением ионов калия, добавка CeF₃ в солевой расплав FLiNaK замедляет движение этих носителей заряда.

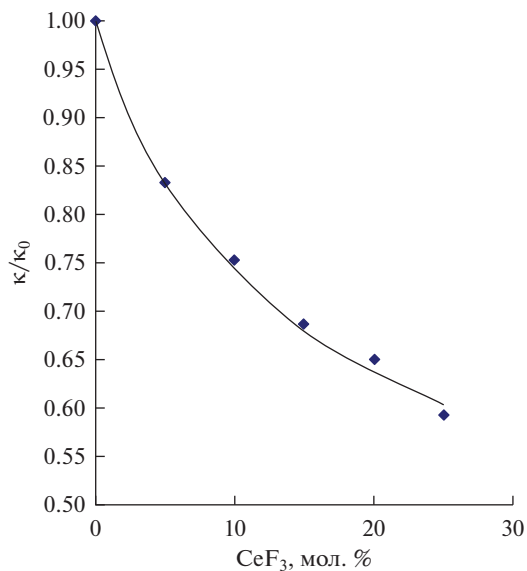


Рис. 5. Изотерма относительной удельной электропроводности системы FLiNaK–CeF₃ при температуре 750°C (κ_0 – удельная электропроводность FLiNaK).

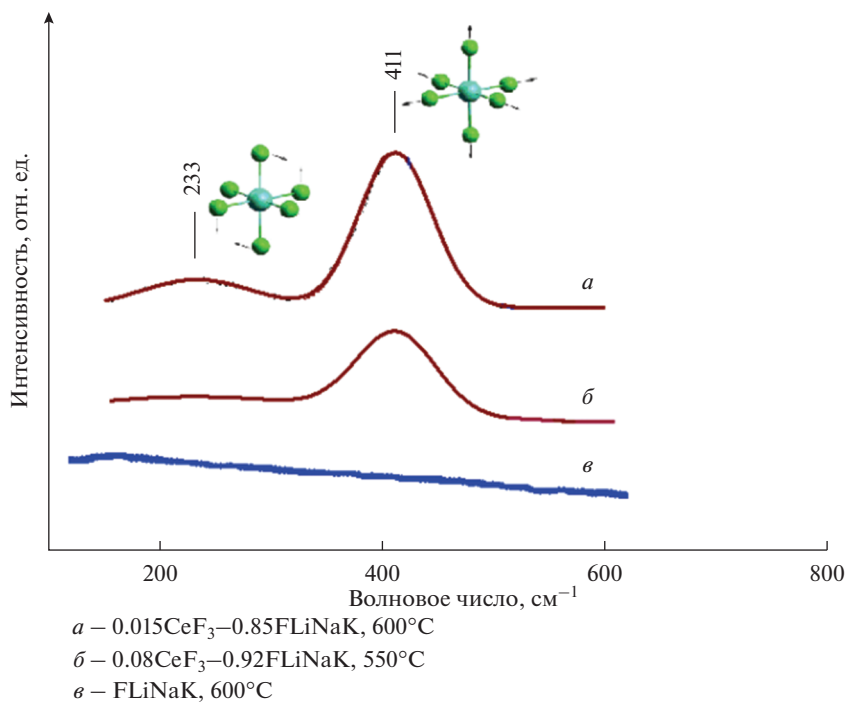


Рис. 6. Раман-спектры расплавленных фторидных смесей 0.85FLiNaK–0.15CeF₃ (*a*), 0.92 FLiNaK–0.08CeF₃ (*б*), FLiNaK (*в*).

Таблица 2. Энергия активации электропроводности расплавов FLiNaK–CeF₃

CeF ₃ , мол. %	Интервал температур, °C	E _A , кДж/моль
0	588–777	15.61
5	561–763	15.84
10	581–780	16.55
15	587–790	19.73
20	586–815	20.56
25	629–820	20.61

КР спектры расплавов FLiNaK–CeF₃

В спектре КР расплавленной фторидной системы FLiNaK какие-либо колебательные полосы не зафиксированы (рис. 6*в*), что указывает на преимущественно кулоновский тип межчастичного взаимодействия и отсутствие устойчивых комплексных структурных группировок [17, 18]. Во фторидных расплавах, содержащих фторид церия, обнаружены колебательные полосы в области 411 и 233 см^{–1} (рис. 6*а*, 6*б*). В соответствии с данными по спектрам КРС фторидных расплавов, содержащих ионы редкоземельных элементов [19–23] высокочастотная компонента отнесена к симметричному валентному колебанию, низкочастотная – к деформационному колебанию группировки комплексного иона CeF₆^{3–}. При увеличении концентрации CeF₃ в расплаве увеличивается количество таких комплексных ионов, что приводит к росту интенсивности наблюдаемых колебательных полос (рис. 6*а*, 6*б*).

ВЫВОДЫ

Исследована удельная электропроводность расплавленных систем FLiNaK и FLiNaK–CeF₃ в зависимости от температуры и содержания CeF₃.

Показано, что уменьшение электропроводности системы FLiNaK–CeF₃ при увеличении концентрации фторида церия может быть связано с образованием сложных комплексных группировок при его растворении в жидкой фазе.

Образование в расплаве комплексного иона CeF₆^{3–} подтверждено спектральными исследованиями.

РФА выполнен в ЦКП “Состав вещества” Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Porter B., Shedd E., Wyche C., Marchant J.P., Knickerbocker R.G. Higher purity ingot cerium from molten salts // J. Metals. 1960. **12**. P. 798–801.
- Henrie T.A. Electro winning rare-earth and uranium metals from their oxides // J. Metals. 1964. **16**. P. 978–981.
- Gray P.M.J The production of pure cerium metal by electrolytic and thermal reduction process // Trans. Inst. Min. Met. 1951. **61**. P. 141–170.
- Новиков Н.И., Новичков В.Х Электропроводность двойных расплавов из фторидов лития, лантана или неодима // Науч. труды Гиретмета. 1973. **43**. С. 19–25.
- Powers W.D., Cohen S.I., Greene N.D. // Nuclear science and engineering. 1963. **71**. P. 200–211. <https://doi.org/10.13182/NSE63-5>
- Ponomarev L.I., Seregin M.V., Mikhailichenko A.A. Preparation of high-purity molten FLiNaK salt by the hydrofluorination process // At. Energ. 2012. **112**. P. 341–345.
- Zong G., Zhang Z., Sun J., Xiao J. // J. Fluor. Chem. 2017. **197**. P. 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2017.03.006>
- Derek J., Toshinobu Y., Janz J. Fusion properties and heat capacities of the eutectic LiF–NaF–KF melt // J. Chem. Eng. Data. 1982. **27**. P. 366–367.

9. Bauman R.P., Porto S.P.S. // *Phys. Rev.* 1967. **161**. P. 842–850.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.161.842>
10. Rimoldi T., Orsi D., Lagonegro P., Ghezzi B., Galli C., Rossi F., Salvati G., Cristofolini L. // *J. Mater Sci: Mater Med.* 2016. **27**. P. 159.
<https://doi.org/10.1007/s10856-016-5769-3>
11. Mushnikov P.N., Tkacheva O.Yu., Kholkina A.S., Zaikov Yu.P., Shishkin V.Yu., Dub A.V. // *Atomic Energy.* 2022. **131**. P. 263–267.
<https://doi.org/10.007/s10512-022-00876-2>
12. Nikolaeva E.V., Zakiryanova I.D., Bovet A.L., Korzun I.V. // *J. Electrochem. Soc.* 2021. **168**. 016502.
<https://doi.org/10.1149/1945-7111/abd64a>
13. Salyulev A., Potapov A. Electrical conductivity of (LiCl–KCl)–SrCl₂ molten mixtures // *Chem. Ing. Data.* 2021. **66**. P. 4563–4571.
14. Janz G.J. Thermodynamic and transport properties for molten salts // *J. Phys. Chem. Ref. Data.* 1988. **17**.
15. Galashev A. // *Appl. Sci.* 2023. **13**. 1085.
<https://doi.org/10.3390/app13021085>
16. Zakiryanov D. // *Molecular simulation.* 2023. **49**. № 8. P. 845–854.
<https://doi.org/10.1080/08927022.2023.2193656>
17. Frandsen B.A., Nickerson S.D., Clark A.D., Solano A., Baral R., Williams J., Neuefeind J., Memmott M. // *J. Nucl. Mat.* 2020. **537**. 152219.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152219>
18. Zakiryanov D. // *Comput. Theor. Chem.* 2022. **1210**. 113646.
<https://doi.org/10.1016/j.comptc.2022.113646>
19. Dracopoulos V., Gilbert B., Papatheodorou G.N. // *J. Chem. Soc. Faraday Trans.* 1998. **94**. P. 2601–2604.
<https://doi.org/10.1039/A802812E>
20. Borresen B., Dracopoulos V., Photiadis G., Gilbertand B., Papatheodorou G.N. // *Proceedings of the Electrochemical Society.* 1996. **1996-7**. P. 11–27.
<https://doi.org/10.1149/199607.0011>
21. Stefanidaki E., Photiadis G.M., Kontoyannis C.G., Vik A.F., Østvold T. // *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* 2002. **11**. P. 2302–2307.
<https://doi.org/10.1039/B111563B>
22. Rollet A.L., Rakmatullin A., Bessada C. // *Int. J. Thermophys.* 2005. **26**. P. 1115–1125.
<https://doi.org/10.1007/s10765-005-6688-6>
23. Zakiryanova I.D., Mushnikov P.N., Nikolaeva E.V., Zaikov Y.P. // *Process.* 2023. **11**. 988.
<https://doi.org/10.3390/pr11040988>

ELECTROCONDUCTIVITY OF MOLTEN FLiNaK AND FLiNaK–CeF₃

E. V. Nikolaeva¹, A. L. Bovet¹, I. D. Zakiryanova¹

¹*Institute of High Temperature Electrochemistry, UB RAS, Yekaterinburg, Russia*

The eutectic mixture LiF–NaF–KF (FLiNaK) is promising as a carrier salt for molten-salt reactors. Cerium fluoride CeF₃ can be considered as a simulant of plutonium fluoride PuF₃. In this work, the temperature dependence of the electrical conductivity of the molten ternary eutectic LiF–KF–NaF containing from 0 to 25 mol % cerium fluoride in the temperature range 480–777°C. FLiNaK–CeF₃ mixtures containing up to 25 mol. % of cerium fluoride were prepared directly in the experimental cell, dropping the required amount of CeF₃ into the melt and keeping mixtures of a given composition for 12 h at temperatures exceeding the liquidus temperatures of the studied compositions. The electrolyte resistance was determined from impedance hodographs, which were taken using the Z-1500J impedance meter. A two-electrode cell with Pt electrodes was used. Analysis of the experimental values of the electrical conductivity of double and triple fluoride melts KF–LiF available in the literature; KF–NaF; LiF–NaF–KF shows that our data on the electrical conductivity of the LiF–NaF–KF (FLiNaK) eutectic mixture are consistent with the general trend in electrical conductivity with increasing KF concentration in the melt. A significant decrease in the specific electrical conductivity of the molten system and a slight increase in the activation energy of electrical conductivity with an increase in the concentration of cerium fluoride are shown. The temperature dependences of the electrical conductivity of the molten system were approximated by second-order polynomials. The formation of the CeF₆^{3–} complex ion in the

melt was confirmed by spectral studies. The Raman spectra of molten FLiNaK and FLiNaK–CeF₃ mixtures containing 8 and 15 mol. % of cerium fluoride were recorded. With an increase in the concentration of CeF₃ in the melt, the amount of CeF₆^{3–} complex ions increases, which leads to an increase in the intensity of the observed vibrational bands.

Keywords: electrical conductivity, impedance, FLiNaK, cerium fluoride, Raman spectra

REFERENCES

- Porter B., Shedd E., Wyche C., Marchant J.P., Knickerbocker R. G. Higher purity ingot cerium from molten salts // *J. Metals*. 1960. **12**. P. 798–801.
- Henrie T.A. Electro winning rare-earth and uranium metals from their oxides // *J. Metals*. 1964. **16**. P. 978–981.
- Gray P.M.J. The production of pure cerium metal by electrolytic and thermal reduction process // *Trans. Inst. Min. Met.* 1951. **61**. P. 141–170.
- Новиков Н.И., Новичков В.Х. Электропроводность двойных расплавов из фторидов лития, лантана или неодима // *Науч. труды Гиретмета*. 1973. **43**. С. 19–25.
- Powers W.D., Cohen S.I., Greene N.D. // *Nuclear science and engineering*. 1963. **71**. P. 200–211. <https://doi.org/10.13182/NSE63-5>
- Ponomarev L.I., Seregin M.V., Mikhaliichenko A.A. Preparation of high-purity molten FLiNaK salt by the hydrofluorination process // *At. Energy*. 2012. **112**. P. 341–345.
- Zong G., Zhang Z., Sun J., Xiao J. // *J. Fluor. Chem.* 2017. **197**. P. 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2017.03.006>
- Derek J., Toshinobu Y., Janz J. Fusion properties and heat capacities of the eutectic LiF–NaF–KF melt // *J. Chem. Eng. Data*. 1982. **27**. P. 366–367.
- Bauman R.P., Porto S.P.S. // *Phys. Rev.* 1967. **161**. P. 842–850. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.161.842>
- Rimoldi T., Orsi D., Lagonegro P., Ghezzi B., Galli C., Rossi F., Salvati G., Cristofolini L. // *J. Mater. Sci.: Mater. Med.* 2016. **27**. P. 159. <https://doi.org/10.1007/s10856-016-5769-3>
- Mushnikov P.N., Tkacheva O.Yu., Kholkina A.S., Zaikov Yu.P., Shishkin V.Yu., Dub A.V. // *Atomic Energy*. 2022. **131**. P. 263–267. <https://doi.org/10.007/s10512-022-00876-2>
- Nikolaeva E.V., Zakiryanova I.D., Bovet A.L., Korzun I.V. // *J. Electrochem. Soc.* 2021. **168**. 016502. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abd64a>
- Salyulev A., Potapov A. Electrical conductivity of (LiCl–KCl)–SrCl₂ molten mixtures // *Chem. Ing. Data*. 2021. **66**. P. 4563–4571.
- Janz G.J. Thermodynamic and transport properties for molten salts // *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 1988. **17**.
- Galashev A. // *Appl. Sci.* 2023. **13**. 1085. <https://doi.org/10.3390/app13021085>
- Zakiryanov D. // *Molecular simulation*. 2023. **49**. № 8. P. 845–854. <https://doi.org/10.1080/08927022.2023.2193656>
- Frandsen B.A., Nickerson S.D., Clark A.D., Solano A., Baral R., Williams J., Neuefeind J., Memmott M. // *J. Nucl. Mat.* 2020. **537**. 152219. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152219>
- Zakiryanov D. // *Comput. Theor. Chem.* 2022. **1210**. 113646. <https://doi.org/10.1016/j.comptc.2022.113646>
- Dracopoulos V., Gilbert B., Papatheodorou G.N. // *J. Chem. Soc. Faraday Trans.* 1998. **94**. P. 2601–2604. <https://doi.org/10.1039/A802812E>
- Borresen B., Dracopoulos V., Photiadis G., Gilbertand B., Papatheodorou G.N. // *Proceedings of the Electrochemical Society*. 1996. **1996-7**. P. 11–27. <https://doi.org/10.1149/199607.0011>
- Stefanidaki E., Photiadis G.M., Kontoyannis C.G., Vik A.F., Østvold T. // *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* 2002. **11**. P. 2302–2307. <https://doi.org/10.1039/B111563B>
- Rollet A.L., Rakmatullin A., Bessada C. // *Int. J. Thermophys.* 2005. **26**. P. 1115–1125. <https://doi.org/10.1007/s10765-005-6688-6>
- Zakiryanova I.D., Mushnikov P.N., Nikolaeva E.V., Zaikov Y.P. // *Process*. 2023. **11**. 988. <https://doi.org/10.3390/pr11040988>