

Л. А. Булавин<sup>1,2</sup>, А. А. Омельчук<sup>3</sup>, Н. В. Файдюк<sup>3</sup>, Ю. А. Плевачук<sup>4</sup>, В. М. Склярчук<sup>4</sup>, Р. Н. Савчук<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, корп. 106, Киев, 03028, Украина*

<sup>2</sup> *Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, просп. акад. Глушкова, 4, Киев, 03022, Украина*

<sup>3</sup> *Институт общей и неорганической химии им. В. И. Вернадского, просп. акад. Палладина, 32/34, Киев, 03680, Украина*

<sup>4</sup> *Львовский национальный университет имени Ивана Франко, ул. Кирилла и Мефодия, 8, Львов, 79005, Украина*

## ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОНЕНТОВ БЛАНКЕТА ДЛЯ ЖИДКОСОЛЕВЫХ РЕАКТОРОВ

В широком температурном интервале проведены исследования температурной зависимости вязкости, электропроводности и термоэлектродвижущей силы (термоЭДС) расплавов систем NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> и NaF–LiF–NdF<sub>3</sub>, которые могут служить компонентами бланкета жидкосолевых реакторов. Установлено, что вязкость расплавов существенно зависит от химического состава и при переходе от эвтектической концентрации к перитектической изменяется в 1,5 – 2 раза. Этот же переход существенно изменяет температурную зависимость термоЭДС. Вместе с тем температурные зависимости электропроводности как для образцов с лантаном, так и для образцов с неодимом практически не меняются.

*Ключевые слова:* жидкосолевые реакторы, бланкет, вязкость, электропроводность, термоЭДС.

### Введение

Жидкосолевой ядерный реактор MSR (Molten Salt Reactor) представляет собой один из многообещающих высокотемпературных типов ядерных реакторов для генерации электроэнергии, а в перспективе и для производства водорода. Этот тип реакторов также может быть использован для сжигания плутония и других трансурановых элементов, возникающих в отработанном ядерном топливе. Последнее обстоятельство крайне важно, ибо стратегия обращения с отработанным ядерным топливом представляет собой одну из важных проблем, которую необходимо будет решать для развития ядерной энергетики.

Жидкосолевой ядерный реактор обычно характеризуется как неклассический тип ядерного реактора [1] из-за специфического характера его ядерного топлива, которое представляет собой жидкость, состоящую из смеси солей фторидов, циркулирующей через активную зону и теплообменник. Делящиеся материалы (уран или трансурановые элементы) растворяются в жидкосолевом носителе, образуя так называемый бланкет, который одновременно является и теплоносителем.

Бланкет жидкосолевого ядерного реактора, работающего в режиме уничтожения высокорadioтоксичных элементов отработанного ядерного топлива, представляет собой смесь фторидов плутония и других трансурановых элементов, растворенных в солевой композиции из фторидов элементов, которые не поглощают нейтроны.

Другой весьма многообещающий режим работы жидкосолевого реактора основан на реализации торий-уранового топливного цикла  $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$ . В этом режиме жидкосолевой MRS работает как реактор-наработчик собственного делящегося материала  $^{233}\text{U}$  из сырьевого материала  $^{232}\text{Th}$ .

Первый MRS мощностью 2,5 МВт был запущен в США в 1954 г. В качестве топлива в нем был использован жидкий раствор NaF(53)–ZrF<sub>4</sub>(41)–UF<sub>4</sub>(6). Максимальная температура бланкета составляла 1155 К.

Дальнейшее совершенствование реакторов MSR продолжалось по программам „Molten Salt Reactor Experiment”(MSRE) и „Molten Salt Breeder Reactor”(MSBR). В рамках программы MSRE был запущен реактор, бланкетом которого была солевая смесь LiF–BeF<sub>2</sub>–ZrF<sub>4</sub>–UF<sub>4</sub>, а теплоносителем второго контура реактора служила смесь LiF–BeF<sub>2</sub>.

Одной из основных проблем в создании реактора MSR является тщательный выбор топливной смеси и контроль за ее химическим составом в процессе эксплуатации. Выбор состава бланкета определяется рядом требований, среди которых небольшое сечение взаимодействия нейтронов с компонентами бланкета [2], невысокая температура плавления солевого сплава. Таким критериям отвечают сплавы эвтектического состава, состоящего из фторидов редкоземельных и щелочных металлов. Относительно невысокую температуру плавления имеют указанные сплавы и перитектическим составом [3].

© Л. А. Булавин, А. А. Омельчук, Н. В. Файдюк, Ю. А. Плевачук, В. М. Склярчук, Р. Н. Савчук, 2014

Целью настоящей работы было исследование физических свойств, а именно электропроводности, термоЭДС и вязкости возможных компонентов бланкета жидкосолевых реакторов.

### Материалы и методики измерений

Для экспериментальных исследований были использованы образцы, полученные путем сплавления в платиновых тиглях в атмосфере аргона фторида лития, фторида натрия марки „х.ч”, трифторида лантана и трифторида неодима марки „ч”.

Дифференциально-термическими исследованиями [4] было показано, что в системе NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> существует одна эвтектика E(La) и одна перитектика P(La). Эвтектика имеет мольный состав NaF(44,0)–LiF(42,0)–LaF<sub>3</sub>(14,0) и температуру плавления (853 ± 2) К. Перитектика P(La) отвечает составу NaF(45,0)–LiF(39,0)–LaF<sub>3</sub>(16,0) с температурой плавления (868 ± 2) К. Дифференциально-термический [5] и рентгеноструктурный анализы [6] показали, что в системе NaF–LiF–NdF<sub>3</sub> существует одна эвтектика и две перитектики. Эвтектика E(Nd) отвечает составу (мол. %) NaF (33,0)–LiF (53,0)–NdF<sub>3</sub> (14,0) и имеет температуру плавления (853 ± 2) К. Первая перитектика P<sub>1</sub>(Nd) имеет температуру плавления (868 ± 2) К и отвечает составу (мол. %): NaF(41,0)–LiF(44,0)–NdF<sub>3</sub>(15,0). Вторая перитектика P<sub>2</sub>(Nd) отвечает составу: NaF(39,0)–LiF(45,0)–NdF<sub>3</sub>(16,0) и имеет температуру плавления (883 ± 2) К.

Изучение температурной зависимости вязкости ионных жидкостей, которые образуются после плавления тройных систем NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> и NaF–LiF–NdF<sub>3</sub> эвтектического и перитектического составов проведено с помощью вискозиметра методом затухающих крутильных колебаний цилиндра, в который помещен графитовый тигель, заполненный исследуемой жидкостью [7]. С целью предупреждения возможного испарения расплава тигель герметично закрывался крышкой и находился в камере с избыточным давлением аргона.

Измерение вязкости проведено в режиме охлаждения образца. Расчет вязкости выполнялся с использованием формулы, полученной Швидковским [9] для крутильного вискозиметра такого типа. При использовании указанного метода относительная ошибка измерения вязкости составляла ~5 %.

Для комплексных исследований электропроводности  $\sigma$  (относительная ошибка измерений ~2 %) и термоЭДС  $S$  (относительная ошибка измерений ~5 %) указанных образцов использована многозонная ячейка из нитрида бора с графитовыми электродами. Использование такой измерительной ячейки позволяет исключить из результатов эксперимента составляющую ошибки определения электропроводности, которая возникает вследствие диффузии исследуемого расплава в керамику ячейки. Измерения  $\sigma$  проведено как на постоянном токе, так и на переменном токе на частотах 1, 10, 25 кГц с использованием прибора RLC-Meter HM8018.

Измерение термоЭДС выполнено по стандартной методике [8] путем создания разницы температур (10 – 20) К вдоль образца. Измерение температуры проведено вольфрам-рениевыми термопарами WRe5/20.

Спай термопары помещался в объеме графита с целью ее защиты от агрессивной среды ионного расплава. Отдельные электроды термопар использовались как потенциальные зонды в случае измерения электропроводности.

### Результаты эксперимента и обсуждение

При измерении вязкости исследуемые образцы эвтектического и перитектического составов E(La), P(La), E(Nd), P<sub>1</sub>(Nd), P<sub>2</sub>(Nd) по очереди помещались в графитовый тигель установки для измерения вязкости [7], где нагревались до максимальной температуры эксперимента  $T_{\max} = 1450$  К. На рис. 1 представлено температурную зависимость вязкости указанных исследованных образцов. Как видим на рис. 1, а, для образца E(La) эвтектического состава системы NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> во всем исследуемом интервале температур вязкость уменьшается с увеличением температуры. Обработка полученных экспериментальных данных с помощью закона Аррениуса

$$\eta = \eta_0 e^{Q/kT}, \quad (1)$$

где  $Q$  – энергия активации вязкого течения, дала следующие значения: в интервале температур (900 – 970) К  $Q = (55 \pm 3)$  кДж/моль и в интервале температур (970 – 1150) К  $Q = (36 \pm 3)$  кДж/моль.

На рис. 1, а представлено и температурную зависимость вязкости ионной жидкой системы NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> перитектического состава P(La). Как видим, при понижении температуры от максимальной вязкость образца P(La) увеличивается и достигает максимального значения при температуре

$T = (1080 \pm 5)$  К. При уменьшении температуры ниже 1080 К значения вязкости уменьшаются. Такое же поведение имеет температурная зависимость вязкости образцов E(Nd), P<sub>1</sub>(Nd), P<sub>2</sub>(Nd) системы NaF–LiF–NdF<sub>3</sub>. Для E(Nd) максимальное значение вязкости для них (см. рис. 1, б) было получено при температуре  $(1005 \pm 5)$  К, а для P<sub>1</sub>(Nd) и P<sub>2</sub>(Nd)  $(1010 \pm 5)$  К и  $(1045 \pm 5)$  К соответственно. Следует отметить, что разность между найденными температурными максимумами вязкости и температурами плавления соответствующих образцов в пределах ошибки температур определенно совпадают. Существование таких особых точек, которые находятся выше температур плавления образцов на  $(150 - 160)$  К, можно объяснить тем, что в исследуемом интервале температур расплавы NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> и NaF–LiF–NdF<sub>3</sub> находятся в неравновесном состоянии, связанным с инконгруэнтным плавлением соединений NaLaF<sub>4</sub>, NaNdF<sub>4</sub> и Na<sub>5</sub>Nd<sub>9</sub>F<sub>32</sub>. Именно неоднородность жидкой системы и приводит к тому, что используемые для расчета вязкости формулы Швидковского [9] уже нельзя применять. Таким образом, для P(La) ниже  $(1080 \pm 5)$  К, для E(Nd) ниже  $(1005 \pm 5)$  К, для P<sub>1</sub>(Nd) ниже  $(1010 \pm 5)$  К и для P<sub>2</sub>(Nd) ниже  $(1045 \pm 5)$  К метод Швидковского не позволяет определить значение вязкости. Вместе с тем следует отметить, что такие измерения позволяют определить максимальные температуры, при которых еще инконгруэнтно не расплавились соединения NaNdF<sub>4</sub> в системе NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> и соединения NaNdF<sub>4</sub>, Na<sub>5</sub>Nd<sub>9</sub>F<sub>32</sub> в системе NaF–LiF–NdF<sub>3</sub>.

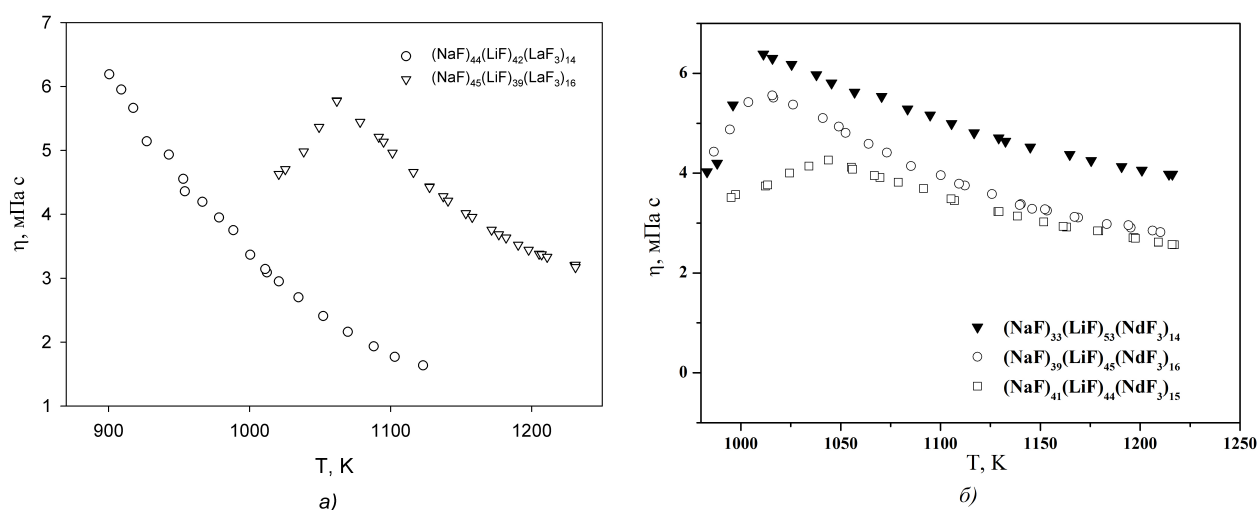


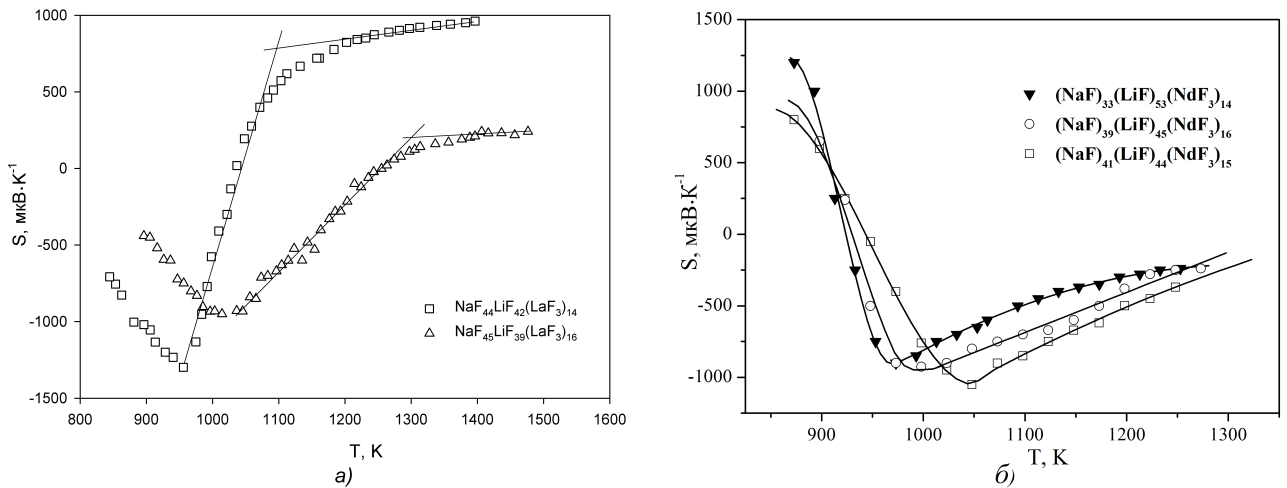
Рис. 1. Температурная зависимость вязкости расплавов NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> (а) и NaF–LiF–NdF<sub>3</sub> (б).

Анализ рис. 1 показывает, что изменение состава расплава существенно влияет на изменение вязкости ионной жидкой системы. Так переход от эвтектики к перитектике в системе с лантаном, в температурном интервале  $(1050 - 1250)$  К, увеличивает вязкость жидкой системы NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> вдвое, а переход от эвтектики к перитектике уменьшает вязкость расплава NaF–LiF–NdF<sub>3</sub> в 1,5 раза.

На рис. 2 представлено результаты измерения температурной зависимости термоЭДС расплавов NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> и NaF–LiF–NdF<sub>3</sub>. Как видно на рис. 2, а, диапазон изменения термо-ЭДС в системе NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> в случае перитектики вдвое меньше, чем в случае эвтектики. Для системы NaF–LiF–NdF<sub>3</sub> диапазон изменения  $S$  с эвтектическим и перитектическим составом практически совпадают.

Обращает на себя внимание тот факт, что если для систем с лантаном измеряемая зависимость  $S(T)$  при увеличении температуры идет от отрицательных значений в точке плавления, то для системы с неодимом  $S(T)$  в точке плавления имеет положительный знак. При увеличении температуры как в одной, так и в другой системах  $S(T)$  возрастает, причем если для образцов с лантаном  $S(T)$  достигает положительных значений, то для образцов с неодимом  $S(T)$  остается отрицательной. Как видно на рис. 2, а, на зависимости  $S(T)$  для E(La) и P(La) есть минимумы при температурах  $(950 \pm 5)$  К и  $(1040 \pm 5)$  К соответственно. На зависимости  $S(T)$  для образцов с неодимом также существуют минимумы (см. рис. 2, б) при температурах  $(970 \pm 5)$  К для E(Nd),  $(990 \pm 5)$  К для P<sub>1</sub>(Nd) и  $(1040 \pm 5)$  К для P<sub>2</sub>(Nd), при которых производная  $\partial S/\partial T$  меняет знак.

Сравнивая на рис. 2 а и б, можно отметить, что если для системы NaF–LiF–NdF<sub>3</sub> температурную зависимость  $S(T)$  приближенно можно описать с помощью двух производных ( $\partial S/\partial T$ ) противоположного знака, то для описания  $S(T)$  в системе NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> такое описание требует наличие уже трех производных ( $\partial S/\partial T$ ).

Рис. 2. Температурная зависимость термоЭДС расплавов NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> (а) и NaF–LiF–NdF<sub>3</sub> (б).

Одной из причин такого поведения температурной зависимости термоЭДС и относительно больших ее абсолютных значений ( $\sim 1000$  мкВ·К<sup>-1</sup>) по сравнению с жидкими металлами ( $\sim 10$  мкВ·К<sup>-1</sup>) и жидкими полупроводниками ( $\sim 100$  мкВ·К<sup>-1</sup>) является перенос тепла ионами, что дает существенный вклад в  $S(T)$ , который, вероятно, чувствителен к структуре солевых расплавов. Отметим, что исследованные образцы обеих систем в жидком состоянии состоят из ионов противоположного знака и небольшой части недиссоциированных молекул, поэтому структура расплавов зависит как от изначального состава компонент, их взаимодействий, так и от температуры.

Поведение термоЭДС  $S(T)$  в таких ионных жидких системах может быть проанализировано с помощью уравнения, которое можно получить из [11]

$$S(T) = \frac{1}{T} \left( \sum \frac{Q_i^+}{e_0 z_i} t_i^+ - \sum \frac{Q_i^-}{e_0 z_i} t_i^- - \frac{Q_e}{e_0} t_e \right) - A, \quad (2)$$

где  $e_0$  - заряд электрона;  $Q_i^+$  - теплота переноса  $i$ -го положительного иона;  $Q_i^-$  - теплота переноса  $i$ -го отрицательного иона;  $Q_e$  - теплота переноса электрона;  $t_i^+$  - парциальный вклад в перенесенный заряд  $i$ -го положительного иона;  $t_i^-$  - парциальный вклад в перенесенный заряд  $i$ -го отрицательного иона;  $t_e$  - парциальный вклад электронов в перенесенный заряд;  $A$  - константа для данной ионной жидкой системы. Изменение знака производной ( $\partial S/\partial T$ ) связано с изменением преобладающего вклада в термоЭДС ионов того или другого знака.

Из формулы (2) можно получить значение температуры, при которой  $S(T) = 0$ :

$$T_{S=0} = \frac{1}{A} \left( \sum \frac{Q_i^+}{e_0 z_i} t_i^+ - \sum \frac{Q_i^-}{e_0 z_i} t_i^- - \frac{Q_e}{e_0} t_e \right). \quad (3)$$

Величина указанной температуры определяется теплотами переноса ионов и электронов, а также парциальными вкладами этих частиц в суммарный перенесенный заряд. Как видно из формулы (3), существует только одна температура, при которой кривая  $S(T)$  пересекает прямую  $S = 0$ , что и подтверждает проведенный эксперимент.

Следует отметить, что на температурной зависимости  $S(T)$  для образцов с лантаном кроме точки минимума существует еще одна особая точка, в которой производная ( $\partial S/\partial T$ ) резко меняет свое значение. Эти точки соответствуют температуре  $T = (1100 \pm 10)$  К для образца эвтектического состава и температуре  $T = (1300 \pm 10)$  К для образца перитектического состава. Резкое изменение величины производной  $\partial S/\partial T$  при указанных выше температурах, по нашему мнению, связано с наличием третьего слагаемого в формуле (3), что характерно для исследованных систем с лантаном, и отсутствует в исследуемых системах с неодимом. Обращает на себя внимание тот факт, что эти точки на кривых  $S(T)$ , свидетельствующие о качественных изменениях в структуре расплава NaF–LiF–LaF<sub>3</sub>, коррелируют с исчезновением предпика в структурном факторе [6].

На рис. 3 представлено температурную зависимость электропроводности расплавов NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> и NaF–LiF–NdF<sub>3</sub>, измеренную на постоянном токе.

В целом исследованные расплавы, как с лантаном, так и с неодимом, эвтектической и перитектической концентрации ведут себя как полупроводники: при возрастании температуры их электропроводность возрастает по закону

$$\sigma = \sigma_0 \exp[-\Delta E / 2kT], \quad (4)$$

где  $\Delta E$  - энергия активации электропроводности.

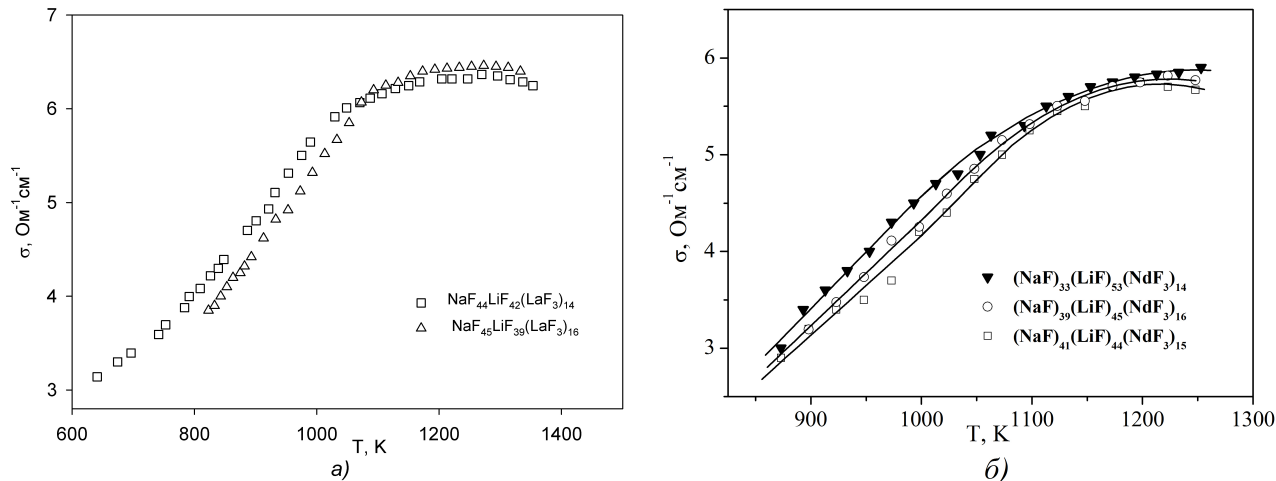


Рис. 3. Температурная зависимость электропроводности расплавов  $\text{NaF-LiF-LaF}_3$  (а) и  $\text{NaF-LiF-NdF}_3$  (б).

Более детальный анализ рис. 3, а показывает, что в случае системы с лантаном указанная полупроводниковая зависимость электропроводности от температуры существует для образца E(La) до температуры 1100 К, а для образца P(La) до температуры 1300 К. Далее наблюдается уменьшение электропроводности с увеличением температуры, которое характерно для жидких металлов. Найденная из формулы (4)  $\Delta E$  для E(La) составила  $\Delta E = 0,29 \pm 0,01$  эВ, а для P(La) -  $\Delta E = 0,31 \pm 0,01$  эВ. На рис. 3, б представлены температурные зависимости  $\sigma(T)$  для образцов E(Nd), P<sub>1</sub>(Nd) и P<sub>2</sub>(Nd). В отличие от образцов с лантаном в данном случае не наблюдается переход от полупроводниковой проводимости к металлической, и найденные величины  $\Delta E$  имеют такие значения:  $\Delta E_1 = 0,42 \pm 0,01$  эВ для E(Nd),  $\Delta E_2 = 0,44 \pm 0,01$  эВ для P<sub>1</sub>(Nd) и  $\Delta E_3 = 0,32 \pm 0,01$  эВ для P<sub>2</sub>(Nd).

На рис. 4 представлены температурные зависимости электропроводности расплавов  $\text{NaF-LiF-LaF}_3$  и  $\text{NaF-LiF-NdF}_3$ , измеренные на разных частотах.

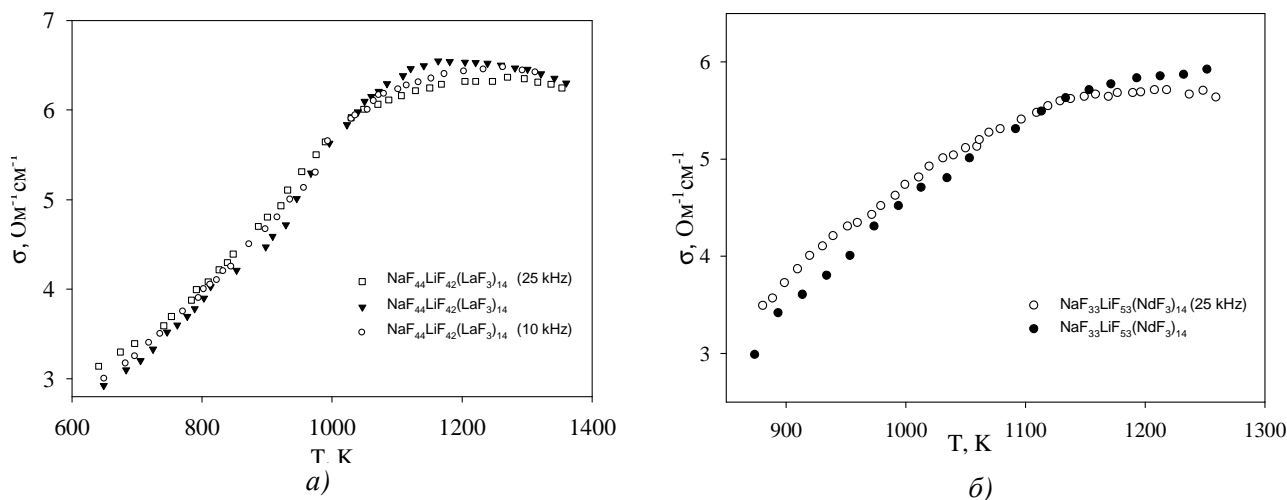


Рис. 4. Температурная зависимость электропроводности расплавов  $\text{NaF}_{44}\text{LiF}_{42}(\text{LaF}_3)_{14}$  (а) и  $\text{NaF}_{33}\text{LiF}_{53}(\text{NdF}_3)_{14}$  (б) на разных частотах.

Анализ рис. 3 и 4 показывает, что существует некоторая частотная дисперсия электропроводности. Можно выделить два противоположных случая зависимости электропроводности расплавов от частоты приложенного поля. В первом случае электропроводность проявляет положительную частотную дисперсию, а во втором случае дисперсия отсутствует или отрицательна. По нашему мнению, частотная зависимость электропроводности может быть обусловлена прыжковым механизмом проводимости  $\sigma_{\text{прыж}}$  и поляризацией микрогетерогенной структуры.

Во втором случае дисперсия отсутствует. В этом случае следует допустить, что доминирующим есть зонный механизм проводимости  $\sigma_{\text{зон}}$ . В случае, если дисперсия отрицательна, происходит металлизация системы.

Можно считать, что в общем случае  $\sigma = \sigma(\omega)$  и равна

$$\sigma(\omega) = \sigma_{\text{зон}} + \sigma_{\text{прыж}}. \quad (5)$$

В зависимости от величины электропроводности на постоянном токе и от частоты приложенного электромагнитного поля в  $\sigma(\omega)$  будет преобладать или зонный, или прыжковый механизм электропроводности. Если  $\sigma_{\text{зон}} \approx \sigma_{\text{прыж}}$ , то будет существовать слабая частотная зависимость электропроводности с более сильной температурной зависимостью, что и наблюдается в эксперименте.

### Выводы

В результате проведенных экспериментов установлено, что вязкость расплавов NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> и NaF–LiF–NdF<sub>3</sub>, которые могут составлять компоненты бланкета жидкосолевых реакторов, существенно зависит от состава расплава: переход от эвтектического состава к перитектическому в 1,5 – 2 раза изменяет вязкость жидкой ионной системы. Этот же переход существенно изменяет температурную зависимость термоЭДС. Вместе с тем температурные зависимости электропроводности как для образцов с лантаном, так и для образцов с неодимом при этом практически не меняются.

В системе NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> при температуре ~1100 К для образца эвтектического состава и при температуре ~1300 К для образца перитектического состава наблюдается переход от полупроводникового типа электропроводности к металлическому типу, что отсутствует в расплаве NaF–LiF–NdF<sub>3</sub>. По нашему мнению, это связано с существенными структурными изменениями в расплаве NaF–LiF–LaF<sub>3</sub>, а именно образованием перколяционного кластера при температуре ~1100 К в образце эвтектического состава и при температуре ~1300 К в образце перитектического состава.

Показано, что перенос заряда в ионных жидкостях можно рассматривать как комбинацию зонного и прыжкового механизмов переноса заряда.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Азаренков Н. А., Булавин Л. А., Залюбовский И. И.* Ядерная энергетика. – Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2012. – 480 с.
2. *Булавин Л. А., Тартаковський В. К.* Ядерна фізика. – К.: Знання, 2006. – 420 с.
3. *Строение расплавленных солей / Под. ред. Е. А. Укше.* – М.: Мир, 1966. – 375 с.
4. *Savchuk P., Faidyuk N.* Investigation of the interaction of components in the System NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> // J ECS Transact. – 2010 – Vol. 33, No. 7. – P. 311–319.
5. *Faidyuk N. V., Savchuk P. M., Fedorov J. V.* Interaction in the system NaF–LiF–NdF<sub>3</sub> // Book of poster abstracts 24-th EUCHEM 2012. Molten Salts and Ionic Liquids Conference (5 – 10.08.2012, Newport, UK). – 2012. – P. 95.
6. *Сокольский В. Э., Роик А. С., Казимиров В. П. и др.* Структура эвтектики NaF - LiF - LaF<sub>3</sub> в твердом и расплавленном состоянии // Неорганические материалы. – 2012. – Т. 48, № 4. – С. 416 - 422.
7. *Булавин Л.А., Плевачук Ю. О., Склярчук В. М.* Критичні явища розшарування в рідинах на землі та в космосі. – К.: Наук. думка, 2011. – 280 с.
8. *Булавин Л. А., Соколовський Б. І., Плевачук Ю. О., Склярчук В. М.* Перехід метал-неметал в іонно-електронних рідинах. – К.: АСМІ, 2008. – 312 с.
9. *Швидковський Е. Г.* Некоторые вопросы вязкости расплавленных металлов. – М.: Гостехиздат, 1955. – 207 с.
10. *Катлер М.* Жидкие полупроводники. – М.: Мир, 1980. – 256 с.
11. *Белащенко Д. К.* Явление переноса в жидких металлах и полупроводниках. – М.: Атомиздат, 1970. – 396 с.

Л. А. Булавин<sup>1,2</sup>, А. А. Омельчук<sup>3</sup>, Н. В. Файдюк<sup>3</sup>, Ю. О. Плевачук<sup>4</sup>, В. М. Склярчук<sup>4</sup>, Р. Н. Савчук<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, корп. 106, Київ, 03028, Україна

<sup>2</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, просп. акад. Глушкова, 4, Київ, 03022, Україна

<sup>3</sup> Інститут загальної і неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського, просп. акад. Палладіна, 32/34, Київ, 03680, Україна

<sup>4</sup> Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. Кирила і Мефодія 8, Львів, 79005, Україна

### ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОНЕНТІВ БЛАНКЕТА ДЛЯ РІДИННОСОЛЬОВИХ РЕАКТОРІВ

У широкому температурному інтервалі проведено дослідження температурної залежності в'язкості, електропровідності та термоелектрорушійної сили (термоЕРС) розплавів систем NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> і NaF–LiF–NdF<sub>3</sub>, які можуть служити компонентами бланкета рідинносольових реакторів. Установлено, що в'язкість розплавів істотно залежить від хімічного складу і при переході від евтектичної концентрації до перитектичної змінюється в 1,5 – 2 рази. Цей же перехід суттєво змінює температурну залежність термоЕРС. Разом з тим температурні залежності електропровідності як для зразків з лантаном, так і для зразків з неодимом практично не змінюються.

*Ключові слова:* рідинносольові реактори, бланкет, в'язкість, електропровідність, термоЕРС.

L. A. Bulavin<sup>1,2</sup>, A. A. Omelchuk<sup>3</sup>, N. V. Faidiuk<sup>3</sup>, Yu. O. Plevachuk<sup>4</sup>, V. M. Sklyarchuk<sup>4</sup>, R. N. Savchuk<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, 12, Lysogirska str., building 106, Kyiv, 03028, Ukraine

<sup>2</sup> Kyiv National Taras Shevchenko University, Faculty of Physics, 2, Prosp. Glushkova, 03022, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup> V. I. Vernadsky Institute of General and Inorganic Chemistry, 32/34, Prosp. Akad. Palladina, 03680, Kyiv, Ukraine

<sup>4</sup> Ivan Franko National University, Department of Metal Physics, 8, Kyrylo & Mephodyi str., 79005, Lviv, Ukraine

### PHYSICAL PROPERTIES OF BLANKET COMPONENTS FOR MOLTEN SALT REACTOR

Electrical conductivity, thermoelectric power and viscosity measurements were carried out in the wide temperature range for the liquid alloys NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> and NaF–LiF–NdF<sub>3</sub>, which can serve as blanket components for the molten salt reactors. The electrical conductivity and the thermoelectric power were measured by a contact method in accordance with the 4-point scheme. The dynamic viscosity was measured by oscillating-cup method. It was found that the melt viscosity significantly depends on the chemical composition and varies 1,5 – 2 times during transition from the eutectic concentration to the peritectic one. The same shift significantly alters the temperature dependence of the thermoelectric power. However, the temperature dependence of the electrical conductivity of the samples with lanthanum and neodymium remain practically unchanged.

*Keywords:* molten salt reactors, blanket, viscosity, electrical conductivity, thermoelectric power.

### REFERENCES

1. Azarenkov N. A., Bulavin L. A., Zalubovskii I. I. Nuclear Energy. – Kharkiv, KNU, 2012. – 480 p. (Rus)
2. Bulavin L. A., Tartakovskii V. K. Nuclear Physics. – Kyiv: Znannya, 2006. – 420 p. (Ukr)
3. Structure and properties of molten salts / Ed. E. A. Ukshe. – Moskva: Mir, 1966. – 375 p. (Rus)
4. Savchuk P., Faidyuk N. Investigation of the interaction of components in the System NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> // J ECS Transact. – 2010. – Vol. 33, No. 7. – P. 311–319.
5. Faidyuk N. V., Savchuk P. M., Fedorov J. V. Interaction in the system NaF–LiF–NdF<sub>3</sub> // Book of poster abstracts 24-th EUCHEM 2012. Molten Salts and Ionic Liquids Conference (August 5 - 10, 2012, Newport, UK) – 2012. – P. 95.
6. Sokolskii V. E., Roik A. S., Kazimirov V. P., Faidyuk N. V., Savchuk P. M. Structure of NaF–LiF–LaF<sub>3</sub> eutectic in solid and molten states // Neorganicheskie Materialy. – 2012. - Vol. 48. – P. 416–422. (Rus)
7. Bulavin, L. A., Plevachuk, Yu. O., Sklyarchuk, V. M. Critical Phenomena of Phase separation on Earth and in Space. – Kyiv: Naukova Dumka, 2011. – 280 p. (Ukr)
8. Bulavin, L. A., Sokolovskii B. I., Plevachuk, Yu. O., Sklyarchuk, V. M. Metal-Nonmetal Transition in Ion-Electron Liquids. – Kyiv: ACMI, 2008. – 312 p. (Ukr)
9. Shvidkovski, E.G. Some problems of molten metals viscosity. – Moskva: Gostekhteorizdat, 1955. (Rus).
10. Cutler M. Liquid semiconductors. - New York: Academic Press, 1977. – 226 p.
11. Belashchenko D.K. Transport phenomena in liquid metals and semiconductors. – Moskva: Atomizdat, 1970. – 396 p. (Rus)

Надійшла 23.09.2013

Received 23.09.2013