

УДК 536.2

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ РАСПЛАВОВ СОЛЕЙ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ВСПЫШКИ

© 2025 С. В. Чернышев*, А. В. Хрустов, А. В. Руденко, М. И. Власов

Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

**E-mail: chernishov@ihte.ru*

Дата поступления 27.11.2024 г.

После доработки 17.01.2025 г.

Принята к публикации 23.01.2025 г.

В данной работе выполнена модернизация известной ячейки для измерения температуропроводности расплавов фторидных солей методом лазерной вспышки. Расплавы галогенидов щелочных металлов, в том числе эвтектическая смесь FLiNaK (46.5 мол. % LiF – 11.5 мол. % NaF – 42 мол. % KF), рассматриваются как перспективные материалы для использования в ядерной энергетике, в частности в жидкосолевых реакторах (ЖСР), где они выступают в роли теплоносителей и среды для деления актинидов. Это делает исследование их теплофизических свойств крайне важным для проектирования активных зон реакторов и систем теплопередачи. Однако, как показывают данные из литературы, измерения температуропроводности расплава FLiNaK сопровождаются значительными расхождениями, связанными с влиянием неучтенных факторов теплопереноса и погрешностями экспериментальных методик. Метод лазерной вспышки, благодаря возможности учитывать конвективный и радиационный теплопереносы, является одним из наиболее предпочтительных для исследования температуропроводности расплавов солей при высоких температурах. Однако данный метод с использованием известной ячейки приводит к завышенным значениям температуропроводности вследствие рассеянного теплового потока. С целью модернизации данной ячейки в расчетной среде COMSOL Multiphysics была построена численная модель, позволившая изучить влияние материалов (Ni, BN, Au) и геометрии ячейки на процессы теплопереноса. Анализ данных позволил получить оптимизированную конструкцию ячейки, что минимизировало долю рассеянного теплового потока, сократило время достижения температурного пика, исключило необходимость калибровочных измерений и расширило температурный диапазон измерений. Экспериментальная проверка модернизированной ячейки проводилась с использованием оборудования Netzsch LFA 467 HT HyperFlash. Полученные данные подтвердили возможность более точного измерения температуропроводности FLiNaK в диапазоне температур 550–800 °C. В частности, использование модернизированной ячейки улучшает воспроизводимость результатов и снижает разброс данных, уменьшая погрешность измерения с 33,8 до 2,6%. Это значительно расширяет перспективы дальнейших исследований высокотемпературных расплавов, что способствует разработке технологий ЖСР нового поколения.

Ключевые слова: FLiNaK, температуропроводность, теплопроводность, метод лазерной вспышки, численное моделирование

DOI: 10.31857/S0235010625010077

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается возобновление интереса к жидкосолевым реакторам (ЖСР) [1, 2] как к реакторам-дожигателям минорных актинидов, образующихся при переработке ядерного топлива, так и к энергетическим реакторам нового поколения. В качестве теплоносителя и среды для деления актинидов в ЖСР предложено использовать расплавы фторидных солей [3, 4], и одной из наиболее перспективных с этой точки зрения является эвтектическая солевая смесь 46.5 мол. % LiF – 11.5 мол. % NaF – 42 мол. % KF (FLiNaK) [5]. Для безопасного проектирования конструкции активной зоны реактора и систем теплопередачи и хранения необходимы данные о теплофизических свойствах используемых расплавов, в частности, коэффициент температуропроводности, необходимый для описания процессов теплообмена в нестационарных условиях. Однако до сих пор в литературе данные о тепло- и температуропроводности расплава соли FLiNaK приводятся со значительным расхождением [6–9].

Любое экспериментальное высокотемпературное измерение теплофизических параметров расплавов солей подвержено различным источникам погрешности в силу тех или иных не учитываемых в модели способов теплопередачи или несовершенства методики измерения [9–11]. Так, методы линейного и плоского источника тепла обладают существенной погрешностью при измерении температуропроводности расплавов солей при высоких температурах ввиду значительной доли шунтирования электрического тока образцом вследствие ионизации расплавов солей [12]. Метод плоского слоя подвержен значительному влиянию естественной конвекции, излучения и рассеяния теплового потока при высоких температурах, поэтому данные, полученные этим методом, также имеют высокую погрешность [13]. Методы переменного зазора и коаксиальных цилиндров значительно продвинулись в решении проблем конвективного и радиационного теплопереносов [14–16], однако ввиду своей стационарности не позволяют измерять температуропроводность напрямую. Метод лазерной вспышки пригоден для измерения температуропроводности расплавов солей напрямую при высоких температурах благодаря разработанной комбинированной трехслойной модели [25, 26], способной учитывать конвективный и радиационный теплопереносы, а также конечность и форму тепловой вспышки.

Метод лазерной вспышки был успешно использован в работе Руденко и др. [17] для измерения температуропроводности расплавов солей нитратов и фторидов в диапазоне температур 240–320 и 550–850 °C соответственно. С этой целью использовалась специально изготовленная измерительная ячейка, в которую помещалась соль. Однако исходные измеренные значения температуропроводности оказывались завышенными, в связи с чем вводился постоянный калибровочный коэффициент, который определялся путем измерения температуропроводности воды как эталонного вещества в диапазоне температур 30–65 °C. Такой подход позволил получить адекватные и воспроизводимые результаты измерений температуропроводности расплавов солей, но тем не менее можно отметить ряд его недостатков. В частности, увеличивается общая длительность эксперимента; отсутствует возможность получения калибровочного коэффициента при высоких температурах, соответствующих температурам измерения расплавов солей; имеется нестабильность сигнала детектора при измерении тем-

пературопроводности воды. Это в совокупности усложняет эксперимент и снижает точность результатов измерений, и, следовательно, предложенная в [17] методика требует дальнейшей оптимизации. В ходе предварительного анализа причин завышения измеряемых по данной методике значений температуропроводности было установлено, что теплопередача энергии тепловой вспышки осуществляется не только по расплаву, но и по боковым стенкам ячейки в обход расплава, что не соответствует граничным условиям трехслойной модели. Решение этой проблемы возможно двумя путями: подбором материала ячейки таким образом, чтобы теплопередача через стенки ячейки была незначительна в сравнении с теплопередачей через образец, либо подбором такой конструкции ячейки, чтобы тепло, переносимое через ее стенки, не вносило вклад в измеряемый сигнал. В этой связи было предложено провести численное моделирование процессов теплопереноса в измерительной ячейке [17] в ходе эксперимента, и на основании созданной модели оценить влияние материала и геометрии конструкции ячейки на получаемые результаты.

Таким образом, целью настоящей работы является модернизация измерительной ячейки путем минимизации влияния неучтенных процессов теплопереноса в ходе измерения за счет подбора оптимальных материала и геометрии ячейки. В работе также для подтверждения результатов моделирования проведено экспериментальное измерение температуропроводности расплава FLiNaK с использованием ячеек начальной [17] (ячейка А) и модернизированной (ячейка Б) конструкций. Все измерения выполнены на оборудовании Netzsch LFA 467 HT HyperFlash, а методика эксперимента и пробоподготовка описаны ранее [17].

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТА

Численное моделирование проводилось в расчетной среде COMSOL Multiphysics методом конечных элементов. Постановка задачи полностью соответствует условиям эксперимента по измерению температуропроводности расплавов солей фторидов и нитратов методом лазерной вспышки в работе Руденко и др. [17] с использованием трехслойной модели теплопередачи. В частности, в моделировании учитывались такие параметры эксперимента, как мощность и продолжительность тепловой вспышки, температура и окружающая газовая среда образца и ячейки, покрытие ячейки графитом, площади возбуждения и регистрации сигнала и другие факторы.

Эскиз ячейки начальной конструкции (ячейки А), для которой проводилось моделирование и которая, соответственно, была использована в экспериментах в работе [17], представлен на рис. 1. Материал ячейки – никелевый сплав НП-2.

Ячейка представляет собой тигель 1 с крышкой 2 сложной формы, плотно соединенные между собой так, что образуют замкнутый герметичный объем. Внутри ячейки располагается образец 3, а пространство над ним 4 заполнено газообразным аргонном. Подведение тепловой вспышки осуществляется к покрытой графитом нижней грани 5 ячейки, регистрация сигнала – с покрытой графитом области детектирования 6 на крышке 2 ячейки. Соответственно, при моделировании подведение тепловой вспышки осуществлялось облучением нижней грани 5 тепловой вспышкой лучистой энергии, а конечным результатом модели-

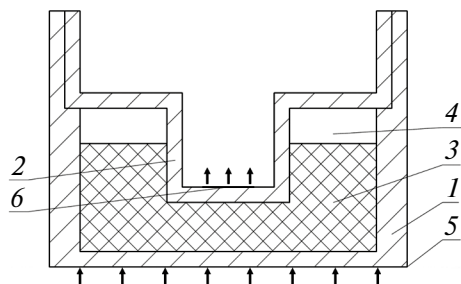


Рис. 1. Изображение измерительной ячейки: 1 – тигель, 2 – крышка, 3 – образец, 4 – пространство над образцом, заполненное аргоном, 5 – нижняя грань, 6 – область детектирования сигнала.

рования были данные об изменении температуры с течением времени в области детектирования 6.

Распространение энергии тепловой вспышки в объеме ячейки описывали законом Фурье. Распределение и изменение температурного поля во времени описывали уравнением теплопроводности с граничными условиями, соответствующими радиационному и конвекционному теплообменам согласно законам Стефана—Больцмана и Ньютона—Рихмана соответственно с осевой симметрией геометрии задачи.

Двухмерная расчетная сетка с треугольными элементами была выполнена по принципу триангуляции Делоне. Для анализа сеточной сходимости в качестве локальной метрики задачи было взято время достижения максимальной усредненной температуры в области детектирования 3 при временном интервале 12 с. Сходимость наблюдалась при суммарном числе степеней свободы свыше двадцати тысяч. В такой постановке время расчета занимало не более десяти минут. Плотность и удельная теплоемкость расплава FLiNaK взяты из работ [18] и [19] соответственно, а коэффициент теплопроводности принят постоянным в исследуемом интервале температур (порядка одного градуса) и оценен как 0.8 Вт/(м·К) при 550 °С на основании доступных литературных данных [15–17, 19].

Верификация модели на примере воды

Проверка соответствия получаемых модельных результатов экспериментальным была осуществлена на примере воды ввиду меньшего количества неучтенных факторов при задании граничных условий в модели, таких как, например, тепловое расширение при высоких температурах, конвекция и излучение в расплавах солей.

Экспериментальные данные представляли собой показания разности потенциалов ИК-датчика, пропорциональные температуре. Данные модельной зависимости усредненной температуры от времени в области детектирования 3, а также экспериментальные данные при температуре 44 °С, приведены на рис. 2. Видно, что между расчетными и экспериментальными данными наблюдается хорошая сходимость. Высокий уровень шума в экспериментальной кривой обусловлен плохой способностью к термостатированию печи в установке при сравнительно малых температурах.

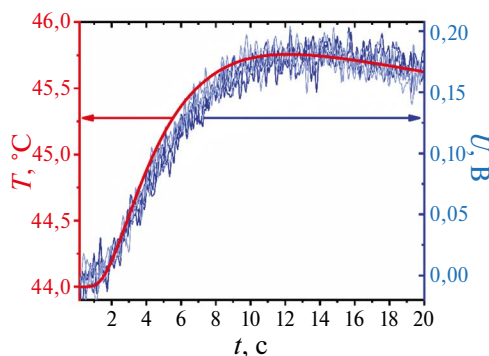


Рис. 2. Сравнение модельных $T=T(t)$ и экспериментальных $U=U(t)$ данных температурной кривой времени в области детектирования в случае, когда образец — вода.

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ

Анализ влияния материала ячейки

С целью минимизации рассеянного теплового потока в измерительной ячейке [17] был проведен анализ влияния материала измерительной ячейки на время достижения максимальной температуры и доли рассеянной теплоты на примере ячеек из никеля, нитрида бора и золота. Выбор материалов обусловлен их существенно различающейся теплопроводностью ($\text{Au} - 282,27$, $\text{Ni} - 63,44$, $\text{BN} - 1,97$ Вт/(м·К)). Теплофизические параметры материалов взяты из базы данных COMSOL Multiphysics. Доли теплоты, приходящиеся на образец δQ_1 и боковые стенки ячейки δQ_{12} за время достижения максимальной температуры t_m , рассчитывались по формуле (1):

$$\delta Q_i = \sqrt{\sum_{k=x,y,z} \left(\frac{\Delta T_i}{\Delta k} \right)^2} / \sum_{j=1,2} \sqrt{\sum_{k=x,y,z} \left(\frac{\Delta T_j}{\Delta k} \right)^2}, \quad i=1,2, \quad (1)$$

где ΔT_1 и ΔT_2 — изменения температур на площадках, через которые проходит тепловой поток по образцу и боковым стенкам соответственно, S_1 и S_1 — площади соответствующих площадок. Величины δQ_i вычислялись в расчетной среде COMSOL Multiphysics с шагом по времени $5 \cdot 10^{-2}$ с.

Результаты моделирования опыта по измерению температуропроводности расплава эвтектической соли FLiNaK при 550°C (рис. 3а) в ячейках из различного материала показали, что использование золота как материала с высокой теплопроводностью приводит к значительному снижению времени достижения максимальной температуры t_m , однако при этом увеличивается доля теплового потока, приходящаяся на боковые стенки ячейки δQ_2 . Измерительная ячейка из нитрида бора как из материала с низкой теплопроводностью позволила бы более чем в 6 раз уменьшить теплоперенос через боковые стенки по сравнению с расплавом, однако изготовление такой ячейки является непростой технической задачей.

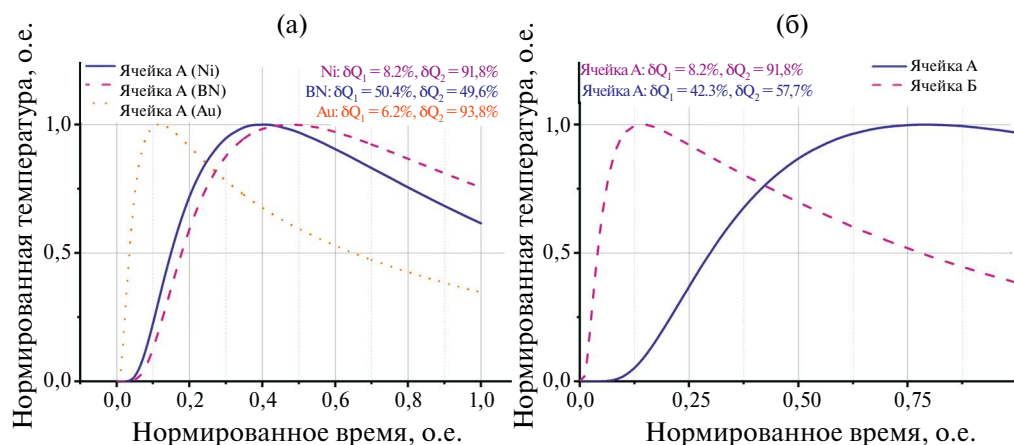


Рис. 3. Нормированные температурные кривые в области детектирования для ячейки А [17], выполненной из Ni, BN и Au (а) и для ячеек А и Б, выполненных из Ni (б). В обоих случаях образцом служит расплав FLiNaK при 550 °С.

Таким образом, в экспериментах целесообразно использовать ячейки из никеля, так как в случае с ячейками из золота уменьшается доля теплоты, приходящаяся на расплав δQ_1 , по сравнению с ячейкой из никеля, а в случае ячеек из нитрида бора затруднительно изготовление.

Анализ влияния геометрии ячейки

Моделировались процессы теплопереноса в зависимости от геометрических параметров (например, высота ячейки, толщина стенок и т.д.) на примере ячейки А [17]

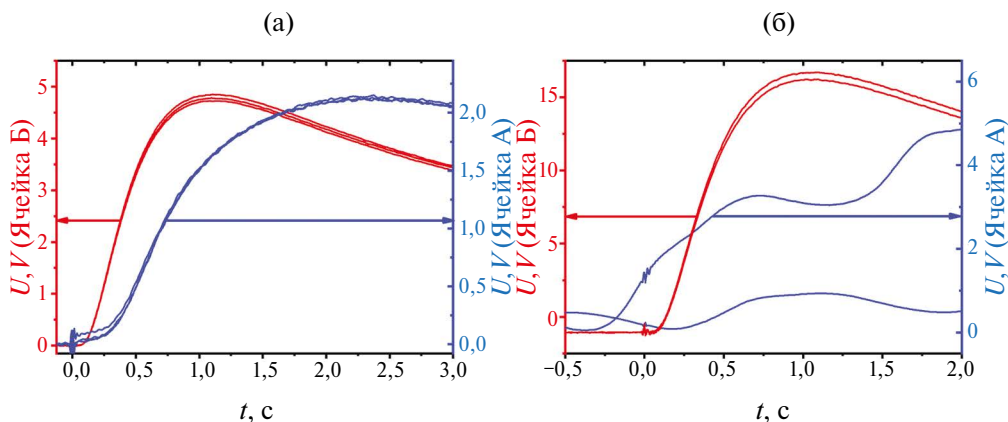


Рис. 4. Сравнение показаний ИК-датчика от времени $U=U(t)$ при измерении теплопроводности расплава соли FLiNaK при 550 °С (а) и 800 °С (б) для ячеек А и Б.

с расплавом соли FLiNaK при температуре 550 °С. Различие в конструкциях ячеек по результатам моделирования сказывается главным образом на максимальной температуре в области детектирования, времени ее достижения t_m и количестве теплоты, приходящемся на образец δQ_1 и боковые стенки ячейки δQ_2 . Анализ данных моделирования показал, что минимизация неучтенных в модели способов теплопереноса коррелирует с уменьшением времени достижения температурного пика и вместе с тем с уменьшением доли количества теплоты, приходящейся на боковые стенки ячейки за время t_m .

Данный подход и выявленные закономерности позволили подобрать оптимальную геометрию измерительной ячейки (ячейка Б), увеличив долю теплоты, приходящейся на образец, более чем в 5 раз по сравнению с ячейкой А [17], а также существенно уменьшив время достижения максимальной температуры (рис. 36).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Измерение температуропроводности расплава соли FLiNaK

Измерение температуропроводности выполнялось в измерительной ячейке модернизированной конструкции (ячейке Б), изготовленной по результатам моделирования. В экспериментах при использовании измерительной ячейки Б наблюдается увеличение амплитуды сигнала и уменьшение времени достижения максимальной температуры более чем в 2 раза по сравнению с ячейкой А, а также снижение уровня шума сигнала (рис. 4а). При температурах свыше 700 °С при измерениях в ячейке А наблюдаются осцилляции сигнала (рис. 4б), приводящие к невозможности вычисления температуропроводности с использованием трехслойной модели, в то время как в ячейке Б регистрируется корректный сигнал.

Значения температуропроводности расплава FLiNaK, измеренные в ячейке Б, имеют существенно меньший разброс при данной температуре по сравнению со значениями, полученными в ячейке А (рис. 5). Наибольшая суммарная погрешность измерения в ячейке А, рассчитанная согласно ГОСТ Р 8.736–2011, составила 33,8%, в то время как для ячейки Б погрешность измерения ниже более чем на порядок и составляет 2,6%. Значительное различие в величинах разброса данных обусловлено, вероятно, степенью удовлетворения граничным условиям трехслойной модели, по которой выполняется расчет. Поскольку модернизация измерительной ячейки методами моделирования позволила снизить теплоперенос через боковые стенки ячейки, это повысило воспроизводимость получаемых результатов. С ростом температуры наблюдается медленный рост температуропроводности, что соответствует литературным данным [15, 16, 19, 22–24] (рис. 5). Данные измерений теплопроводности из работ [15, 16, 24] были пересчитаны на температуропроводность с использованием значений удельной теплоемкости и плотности, взятых из работ [17] и [18] соответственно.

Несмотря на то, что по данным моделирования полностью избежать теплопереноса через боковые стенки ячейки Б не удалось, экспериментальные значения температуропроводности не нуждаются в нормировке с использованием коэффициента, определяемого при измерении температуропроводности воды. Это подтверждается совпадением экспериментальных данных с литературными при измерении температуропроводности воды в ячейке Б.

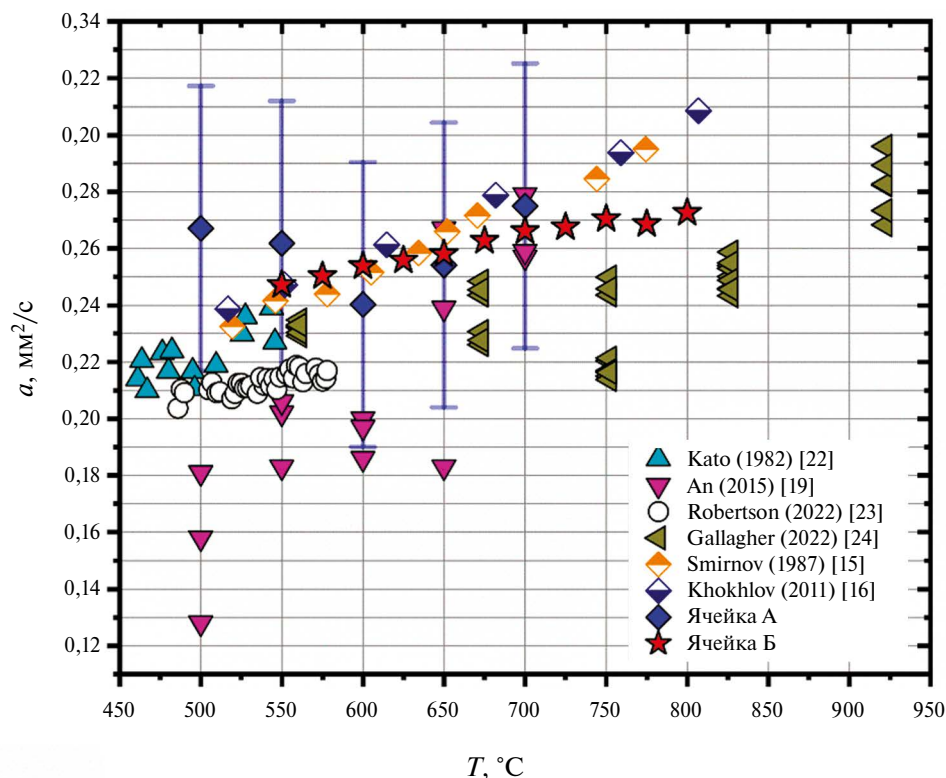


Рис. 5. Сравнение данных измерений температуропроводности расплава соли FLiNaK методом лазерной вспышки, полученных с использованием ячеек А и Б, а также литературных данных. Для ячейки А учтен калибровочный коэффициент 1,8.

ВЫВОДЫ

В работе построена численная модель эксперимента по определению температуропроводности расплава соли FLiNaK методом лазерной вспышки для измерительной ячейки из работы [17] и проведена верификация модели на примере воды. Для данной измерительной ячейки проведен анализ вклада материала и конструкции в процессы теплопереноса. Результаты моделирования позволили подобрать оптимальную конструкцию измерительной ячейки, что привело к уменьшению доли количества теплоты, приходящейся на боковую стенку ячейки более чем в 6 раз. Это позволило снизить разброс экспериментальных данных, уменьшив погрешность измерения с 33,8 до 2,6%, и исключить необходимость выполнения калибровочных измерений с использованием воды как эталона. Более того, проведенная модернизация конструкции измерительной ячейки благодаря повышению доли теплоты, передаваемой на образец относительно передаваемой на конструкцию ячейки, обеспечила возможность корректного измерения температуропроводности расплавов при температурах свыше 700 °С, что ранее было невозможно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ignatiev V.V. Molten Salt Reactors // Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. 2020. P. 2–16.
2. Dr. Charles, W. Forsberg. Molten Salt Reactors (MSRs) // The Americas Nuclear Energy Symposium (ANES 2002), American Nuclear Society. 2002. P. 16–18.
3. Mignacca B., Locatelli G. Economics and finance of Molten Salt Reactors // Progress in Nuclear Energy. 2020. № 129.
4. J. Serp. The molten salt reactor (MSR) in generation IV: overview and perspectives // Progress in Nuclear Energy. 2014. № 77. P. 308–319.
5. Holcomb D.E., Cetiner S.M. An overview of liquid-fluoride-salt heat transport systems // U.S. Department of energy. 2010. P. 156.
6. Ambrosek J., Anderson M., Sridharan K., Current status of knowledge of the fluoride salt (FLiNaK) heat transfer // Nucl. Technol. 2009. **165**. № 2. P. 166–173.
7. Khokhlov V., Ignatiev V., Afonichkin V. Evaluating physical properties of molten salt reactor fluoride mixtures // Journal of Fluorine Chemistry. 2009. № 130. P. 30–37.
8. McMurray J.W., et al. Roadmap For Thermal Property Measurements of Molten Salt Reactor systems // Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States). 2021. № 1865. P. 4–22.
9. Williams D.F., Toth L. M., Clarno K. T. Assessment of Candidate Molten Salt Coolants For the Advanced High-Temperature Reactor (AHTR) // Oak Ridge National Laboratory. 2006. № 12.
10. Magnusson J.M., Memmott M., Munro T. Review of thermophysical property methods applied to fueled and un-fueled molten salts // Annals of Nuclear Energy. 2020. № 146.
11. Chliatzou C.D., Assael M.J., Antoniadis K.D., Huber M.L., Wakeham W.A. Reference Correlations for the Thermal Conductivity of 13 Inorganic Molten Salts. // Journal of Physical and Chemical Reference Data. 2018. **47**. № 3.
12. Santini R., Tadrast L., Pantaloni J., Cerisier P. Measurement of thermal conductivity of molten salts in the range 100–500 C, Int. J. // Heat Mass Transfer. 1984. **27**. № 4. P. 623–626.
13. Cooke J.W. Development of the variable-gap technique for measuring the thermal conductivity of fluoride salt mixtures // U.S. Atomic energy commission. 1973. № W-7405-eng 26.
14. Ryan C. Gallagher, Anthony Birri, Nick Russell, N. Dianne B. Ezell. Design and performance of a variable gap system for thermal conductivity measurements of high temperature, corrosive, and reactive fluids // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. № 192.
15. Smirnov M.V., Khokhlov V.A., Filatov E.S. Thermal conductivity of molten alkali halides and their mixtures // Electrochimica Acta. 1987. **32**. P. 1019–1026.
16. Khokhlov V., Korzun I., Dokutovich V., Filatov E. Heat capacity and thermal conductivity of molten ternary lithium, sodium, potassium, and zirconium fluorides mixtures. // Journal of Nuclear Materials. 2011. **1–3**. № 410. P. 32–38.
17. Rudenko A., Redkin A., Il'ina E., Pershina S., Mushnikov P., Zaikov Y., Kumkov S., Liu Y., Shi W. Thermal Conductivity of FLiNaK in a Molten State. // Materials. 2022. **15**. № 5603. P. 2–14.
18. Cheng J.-H., Zhang P., An X.-H., Wang K., Zuo Y., Yan H.-W., Li, Z. A Device for Measuring the Density and Liquidus Temperature of Molten Fluorides for Heat Transfer and Storage // Chinese Physics Letters. 2013. **30**. № 12. P. 126–501.
19. An X.-H., Cheng J.-H., Yin H.-Q., Xie L.-D., Zhang P. Thermal conductivity of high temperature fluoride molten salt determined by laser flash technique. // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. № 90. P. 872–877.
20. Coulson J.M., Richardson J.F. Chemical Engineering // Pergamon Press. 1990. **1**.
21. Bejan A. Heat Transfer, Wiley // Evolution, Design and Performance. 1993. P. 611.

22. Kato Y., Furukawa K., Araki N., Kobayasi K. Thermal diffusivity measurement of molten salts by use of a simple ceramic cell. // In Proceedings of the 8th European Thermophysical Properties Conference. 1982. **15**.
23. Robertson S., Wiser R., Yang W., Kang D., Choi S., Baglietto E., Short, M. The curious temperature dependence of fluoride molten salt thermal conductivity. // J. Appl. Phys. 2022. № 131.
24. Ryan C. Gallagher, Anthony Birri, Nick G. Russell, Anh-Thu Phan, Aïmen E. Gheribi. Investigation of the thermal conductivity of molten LiF-NaF-KF with experiments, theory, and equilibrium molecular dynamics // Journal of Molecular Liquids. 2022. № 361.
25. A. Cape, G.W. Lehman. Temperature and finite pulse-time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity // J. Appl. Phys. 1963. **34 (7)**. 1909–1914.
26. L. Dusza. Combined solution of the simultaneous heat loss and finite pulse corrections with the laser flash method // High Temp.-High Press. 1995–1996. **27/28**. 467–473.

MODERNIZATION OF THE MEASURING CELL DESIGN FOR DETERMINING THE THERMAL DIFFUSIVITY OF SALT MELTS BY LASER FLASH METHOD

S. V. Chernyshev*, A. V. Khrustov, A. V. Rudenko, M. I. Vlasov

Institute of High-Temperature Electrochemistry, Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

**E-mail: chernishov@ihte.ru*

In this work, a well-known cell for measuring the diffusivity of fluoride salt melts by the laser flash method has been modernized. Alkali metal halide melts, such as the eutectic mixture FLiNaK (46.5 mol% LiF – 11.5 mol% NaF – 42 mol% KF), are considered promising materials for use in nuclear power engineering, particularly in molten salt reactors (MSRs), where they act as coolants and actinide fission media. This makes the study of their thermophysical properties extremely important for the design of reactor cores and heat transfer systems. However, as data from the literature show, measurements of the thermal diffusivity of FLiNaK melts are accompanied by significant discrepancies associated with the influence of unaccounted for heat transfer factors and errors in experimental techniques. The laser flash method is one of the preferred methods for studying the thermal diffusivity of salt melts at high temperatures due to its ability to account for convective and radiative heat transfer. However, this method using a known cell leads to overestimated values of thermal diffusivity due to dissipated heat flow. In order to modernize this cell, a numerical model was built in COMSOL Multiphysics, which allowed us to study the influence of materials (Ni, BN, Au) and cell geometry on the heat transfer processes. Data analysis allowed to obtain an optimized cell design that minimized the fraction of heat flow lost, reduced the time to reach the temperature peak, eliminated the need for calibration measurements and extended the temperature range of measurements. Experimental validation of the improved cell was carried out using Netzsch LFA 467 HT HyperFlash equipment. The data obtained confirmed the possibility of more accurate measurement of FLiNaK diffusivity in the temperature range of 550–800°C. Particularly, using of the modernized measuring cell improves the reproducibility of the results and reduces the data scatter, reducing measurement error from 33,8 to 2,6%. These widens the prospects for further studies of high temperature melts, contributing to the development of new generation MSR technologies.

Keywords: FLiNaK, thermal diffusivity, thermal conductivity, laser flash method, numerical simulation

REFERENCES

1. Ignatiev V.V. Molten Salt Reactors // Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. 2020. P. 2–16.
2. Dr. Charles, W. Forsberg. Molten Salt Reactors (MSRs) // The Americas Nuclear Energy Symposium (ANES 2002), American Nuclear Society. 2002. P. 16–18.
3. Mignacca B., Locatelli G. Economics and finance of Molten Salt Reactors // Progress in Nuclear Energy. 2020. № 129.
4. J. Serp. The molten salt reactor (MSR) in generation IV: overview and perspectives // Progress in Nuclear Energy. 2014. № 77. P. 308–319.
5. Holcomb D.E., Cetiner S.M. An overview of liquid-fluoride-salt heat transport systems // U.S. Department of energy. 2010. P. 156.
6. Ambrosek J., Anderson M., Sridharan K., Current status of knowledge of the fluoride salt (FLiNaK) heat transfer // Nucl. Technol. 2009. **165**. № 2. P. 166–173.
7. Khokhlov V., Ignatiev V., Afonichkin V. Evaluating physical properties of molten salt reactor fluoride mixtures // Journal of Fluorine Chemistry. 2009. № 130. P. 30–37.
8. McMurray J.W., et al. Roadmap For Thermal Property Measurements of Molten Salt Reactor systems // Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States). 2021. № 1865. P. 4–22.
9. Williams D.F., Toth L.M., Clarno K.T. Assessment of Candidate Molten Salt Coolants For the Advanced High-Temperature Reactor (AHTR) // Oak Ridge National Laboratory. 2006. № 12.
10. Magnusson J.M., Memmott M., Munro T. Review of thermophysical property methods applied to fueled and un-fueled molten salts // Annals of Nuclear Energy. 2020. № 146.
11. Chliatzou C.D., Assael M.J., Antoniadis K.D., Huber M.L., Wakeham W.A. Reference Correlations for the Thermal Conductivity of 13 Inorganic Molten Salts. // Journal of Physical and Chemical Reference Data. 2018. **47**. № 3.
12. Santini R., Tadrast L., Pantaloni J., Cerisier P. Measurement of thermal conductivity of molten salts in the range 100–500 C, Int. J. // Heat Mass Transfer. 1984. **27**. № 4. P. 623–626.
13. Cooke J.W. Development of the variable-gap technique for measuring the thermal conductivity of fluoride salt mixtures // U.S. Atomic energy commission. 1973. № W-7405-eng 26.
14. Ryan C. Gallagher, Anthony Birri, Nick Russell, N. Dianne B. Ezell. Design and performance of a variable gap system for thermal conductivity measurements of high temperature, corrosive, and reactive fluids // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. № 192.
15. Smirnov M.V., Khokhlov V.A., Filatov E.S. Thermal conductivity of molten alkali halides and their mixtures // Electrochimica Acta. 1987. **32**. P. 1019–1026.
16. Khokhlov V., Korzun I., Dokutovich V., Filatov E. Heat capacity and thermal conductivity of molten ternary lithium, sodium, potassium, and zirconium fluorides mixtures. // Journal of Nuclear Materials. 2011. **1–3**. № 410. P. 32–38.
17. Rudenko A., Redkin A., Il'ina E., Pershina S., Mushnikov P., Zaikov Y., Kumkov S., Liu Y., Shi W. Thermal Conductivity of FLiNaK in a Molten State. // Materials. 2022. **15**. № 5603. P. 2–14.
18. Cheng J.-H., Zhang P., An X.-H., Wang K., Zuo Y., Yan H.-W., Li, Z. A Device for Measuring the Density and Liquidus Temperature of Molten Fluorides for Heat Transfer and Storage // Chinese Physics Letters. 2013. **30**. № 12. P. 126–501.
19. An X.-H., Cheng J.-H., Yin H.-Q., Xie L.-D., Zhang P. Thermal conductivity of high temperature fluoride molten salt determined by laser flash technique. // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. № 90. P. 872–877.
20. Coulson J.M., Richardson J.F. Chemical Engineering // Pergamon Press. 1990. **1**.
21. Bejan A. Heat Transfer, Wiley // Evolution, Design and Performance. 1993. P. 611.

-
22. Kato Y., Furukawa K., Araki N., Kobayasi K. Thermal diffusivity measurement of molten salts by use of a simple ceramic cell. // In Proceedings of the 8th European Thermophysical Properties Conference. 1982. **15**.
 23. Robertson S., Wiser R., Yang W., Kang D., Choi S., Baglietto E., Short, M. The curious temperature dependence of fluoride molten salt thermal conductivity. // J. Appl. Phys. 2022. № 131.
 24. Ryan C. Gallagher, Anthony Birri, Nick G. Russell, Anh-Thu Phan, Aïmen E. Gheribi. Investigation of the thermal conductivity of molten LiF-NaF-KF with experiments, theory, and equilibrium molecular dynamics // Journal of Molecular Liquids. 2022. № 361.
 25. A. Cape, G.W. Lehman. Temperature and finite pulse-time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity // J. Appl. Phys. 1963. **34 (7)**. 1909–1914.
 26. L. Dusza. Combined solution of the simultaneous heat loss and finite pulse corrections with the laser flash method // High Temp.-High Press. 1995–1996. **27/28**. 467–473.