

2. Никитин А.Д. Влияние водяного пара на физико-химические процессы в парогазовой установке с внутрицикловой газификацией твердого топлива: дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, УрФУ, 2021. – 196 с.

3. Основы практической теории горения: учебное пособие для вузов / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др.; под ред. В.В. Померанцева. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1986. – 312 с.

УДК: 536.2

**С. В. Чернышев^{1,2}, А. В. Хрустов¹, А. В. Руденко¹, А. А. Редькин¹,
М. И. Власов¹**

¹ ФГБУН «Институт высокотемпературной электрохимии»
Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Россия;

² ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ РАСПЛАВА СОЛИ LiF–NaF–KF МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ВСПЫШКИ

Аннотация. Точное измерение температуропроводности расплава соли FLiNaK в настоящее время является актуальной и важной задачей. В данной работе температуропроводность расплава соли FLiNaK измерена методом лазерной вспышки, а также разработана численная модель в пакете COMSOL Multiphysics, описывающая процесс теплопередачи в опыте.

Ключевые слова: жидкосолевой реактор, температуропроводность, FLiNaK, метод лазерной вспышки, численное моделирование, COMSOL Multiphysics.

Abstract. Accurate measurement of the FLiNaK's molten salt thermal diffusivity is currently an urgent and important task. In this work, the thermal diffusivity of the FLiNaK's molten salt is measured by laser flash technique, and numerical modeling is carried out in the COMSOL Multiphysics computational environment.

Key words: molten salt reactor, thermal diffusivity, FLiNaK, laser flash technique, numerical simulation, COMSOL Multiphysics.

В настоящее время одним из наиболее перспективных ядерных реакторов следующего поколения считается жидкосолевой реактор (ЖСР) [1, 2], в котором теплоносителем выступает расплав солей металлов. В этой связи большую роль играют теплофизические свойства расплавленных солей, тесно связанные с характеристиками теплопередачи, которые необходимы для инженерного проектирования конструкции активной зоны реактора и систем теплопередачи и хранения. Одной из наиболее перспективных для применения в ЖСР является эвтектическая фторидная соль 46.5 мол. % LiF–11.5 мол. % NaF–42 мол. % KF (FLiNaK) [3], обладающая хорошей теплопередающей и аккумулирующей способностями. Однако ее теплофизические свойства достаточно плохо изучены

[4], в связи с чем целью данной работы было изучение температуропроводности расплава FLiNaK методом лазерной вспышки.

Измерения выполнены на установке Netzsch LFA 467 HT HyperFlash. Конструкция ячейки выполнена из никеля, покрытого тонким слоем графита для повышения поглощающей и излучательной способностей. Выявлено, что на проведение опыта значительное влияние оказывает геометрия ячейки. Экспериментально подобрана конструкция ячейки, позволяющая получать более достоверные результаты за счет увеличения механической стойкости (предотвращает деформацию вследствие температурного расширения) и уменьшения теплопереноса через конструкцию ячейки (необходимо, чтобы энергия импульса поглощалась преимущественно образцом). Однако полностью исключить фактор отклонения реальной геометрии ячейки от заданной невозможно, в связи с чем перед измерением FLiNaK ячейка калибровалась с использованием воды как эталона. Результаты измерения температуропроводности FLiNaK с учетом калибровочного коэффициента представлены на рисунке 1.

Разработана модель в расчетной среде COMSOL Multiphysics, описывающая процесс теплопереноса и распределение температуры в ячейке методом конечных элементов. Сравнение модельной кривой изменения температуры от времени в центральной точке ячейки с экспериментальной при измерении температуропроводности воды представлено на рисунке 2.

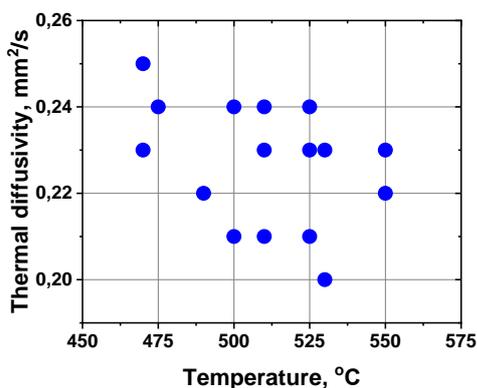


Рис. 1. Результаты измерения температуропроводности FLiNaK с учетом калибровочного коэффициента

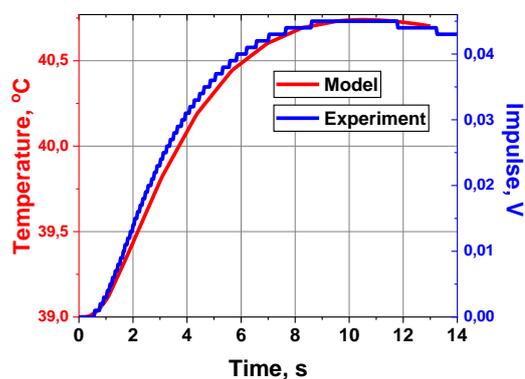


Рис. 2. Сравнение модельной температурной кривой от времени с экспериментальной для воды

В данной работе рассматривается нестационарный процесс теплопереноса в исследуемой ячейке. На рисунках 3, 4 представлены эскизы рассматриваемой ячейки в осевой симметрии и в трехмерных декартовых координатах соответственно. Для проведения оптимизации геометрических параметров экспериментальной ячейки была создана ее параметризованная трехмерная модель.

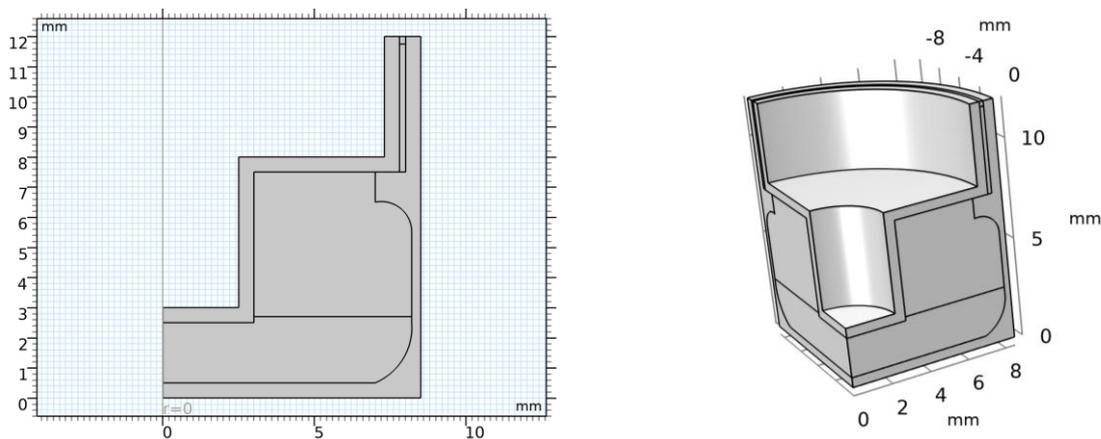


Рис. 3, 4. Эскизы исследуемой ячейки в осевой симметрии и трехмерных декартовых координатах соответственно

В начале численного эксперимента температура в каждой рассматриваемой области задается постоянной и соответствует температуре, при которой происходит лазерная вспышка. Процесс переноса тепла осуществляется посредством четырех механизмов – теплопроводности, естественной и вынужденной конвекции и излучения. Теплофизические свойства стенок ячейки соответствуют никелю, а исследуемого образца в объеме ячейки – расплаву соли FLiNaK. Над образцом в ячейке задается атмосфера аргона, а над непосредственно ячейкой – гелия. Конструкция ячейки и образец описываются моделью сплошной среды, а аргон и гелий – моделью идеального газа.

Моделирование процесса теплопереноса происходит после теплового воздействия на нижнюю стенку ячейки конечной длительности. Время воздействия и тепловой поток принимаются равными реальным параметрам теплового воздействия в эксперименте.

Модель включает в себя учет вынужденной конвекции с боковой стенки (обдувание атмосферой гелия при заданной скорости и нормальном атмосферном давлении). В расчете применяется тетраэдрическая расчетная сетка, построенная по алгоритму триангуляции Делоне. Учитывается излучение со стенок ячейки, подчиняющееся закону Стефана-Больцмана, а также конвективный теплопоток, рассчитываемый на основании закона теплоотдачи Ньютона-Рихмана. Коэффициент теплоотдачи рассчитывается индивидуально для каждой стенки в зависимости от температуры окружающей среды и числа Рейнольдса по эмпирическим формулам, а коэффициент излучения принимается равным коэффициенту излучения графита.

Температурное распределение в объеме ячейки представлено на рисунке 5 для начала измерений и на рисунке 6 для конца измерений для расплава соли FLiNaK. Ожидается большая часть теплового потока приходится на конструкцию ячейки, так как она изготовлена из никеля с большей теплопроводностью, чем расплав соли.

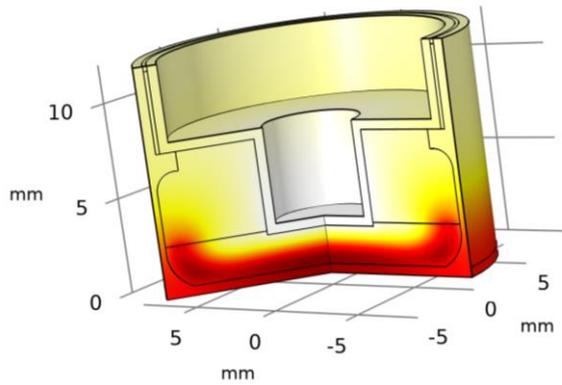


Рис. 5. Распределение температуры по поверхности ячейки в начале измерений

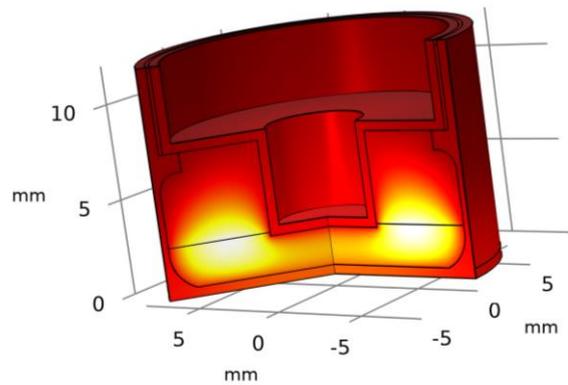


Рис. 6. Распределение температуры по поверхности ячейки в конце измерений

Таким образом, проведены измерения температуропроводности расплава соли FLiNaK, экспериментально подобрана оптимальная конструкция ячейки для проведения измерений и выявлено значительное влияние технологии производства, фактор которой учтен путем калибровки ячейки на воде. В расчетной среде COMSOL Multiphysics построена модель, точно отображающая процесс теплопереноса в опытах с водой и качественно – ввиду факторов, связанных с технологией производства ячейки и ее деформацией вследствие нагрева – расплава соли FLiNaK. Расчет теплофизических параметров и параметризованная геометрия ячейки в модели позволяет быстро анализировать вклад конструкции в проводимые измерения и подобрать оптимальные размеры.

Список использованных источников

1. Ignatiev V.V. Molten Salt Reactors. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences (2020).
2. , Molten Salt Reactors (MSRs) / Dr. Charles, W. Forsberg // The Americas Nuclear Energy Symposium (ANES 2002), American Nuclear Society, 16–18 (2002).
3. D.E. Holcomb, S.M. Cetiner, An overview of liquid-fluoride-salt heat transport systems, 156, (2010).
4. Current status of knowledge of the fluoride salt (FLiNaK) heat transfer / J. Ambrosek, M. Anderson, K. Sridharan // Nucl. Technol. 165 (2), 166–173 (2009).