УТВЕРЖДАЮ
Директор ИМЕТ УрО РАН,
академик РАН, профессор,
доктор физико-математических наук
_____ А.А. Рempель
подпись
«14» января 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения Российской академии наук на диссертационную работу Кеслер Ксении Олеговны «Теплофизические свойства расплавленных галогенидных смесей, содержащих хлорид и фторид церия», представленную на соискание учёной степени кандидата химических наук по специальность 1.4.4. Физическая химия

Актуальность работы.

Применение расплавленных галогенидных смесей в качестве теплоносителей и реакционных сред для жидкосолевых реакторов и пирохимической переработки ОЯТ требует точных знаний об их теплофизических свойствах. Работа направлены на восполнение существующего дефицита прецизионных экспериментальных данных о теплопроводности, температуропроводности и теплоёмкости систем, содержащих церий. Полученные автором результаты имеют высокую практическую значимость для надежного теплотехнического проектирования высокотемпературных энергетических установок и оптимизации технологических процессов в электрохимической промышленности. Всё это свидетельствует о том, что, тема исследований, выполненных в рамках диссертационной работы, вполне актуальна.

Научная новизна и теоретическая значимость диссертационного исследования.

- Впервые экспериментально определены температурные и концентрационные зависимости коэффициента теплопроводности расплавов трихлорида церия и его смесей с хлоридами щелочных металлов, растворов трифторида церия в эвтектической смеси FLiNaK.
- Выполнена оценка радиационного вклада теплопроводности для расплавленных смесей FLiNaK и 0,85FLiNaK–0,15CeF_3 методом коаксиальных цилиндров с изменяемой толщиной солевого слоя.
- Проанализировано влияние аниона на молярную теплопроводность для расплавленных смесей изокатионного состава 0,75FLiNaK–0,25CeF_3 и 0,75ClLiNaK–

$0{,}25CeCl_3$.

- Впервые получены значения удельной изобарной теплоёмкости близи температуры ликвидуса расплавленной смеси FLiNaK с различным содержанием фторида церия.
- Предложено эмпирическое уравнение для расчёта изобарной теплоёмкости хлоридных расплавов вблизи их температуры ликвидуса.
- Получены значения температуропроводности в зависимости от температуры и состава для всех изученных систем.

Практическая значимость результатов работы.

- Полученные зависимости удельной и молярной теплопроводности, изобарной теплоёмкости и температуропроводности от температуры и состава могут быть использованы в качестве справочных данных при проведении теплотехнических расчётов.
- Разработано эмпирическое уравнение для расчёта изобарной теплоёмкости хлоридных расплавов вблизи температуры ликвидуса. Оно позволяет оценивать свойства систем, для которых экспериментальные данные в литературе отсутствуют или их получение затруднено.
- Результаты работы необходимы для выбора оптимального состава расплавов и расчёта тепловых балансов в металлургии и энергетики.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием для экспериментов современного оборудования и комплекс релевантных экспериментальных физических, физико-химических и электрохимических методик. В частности, в работе используется современное профессиональное электрохимическое лабораторное оборудование. Также, достоверность результатов обеспечивается сопоставлением ряда полученных значений с величинами, найденными другими исследователями.

Диссертационная работа включает в себя введение, пять глав, заключение и список литературы, состоящий из 248 наименований, изложена на 116 страницах, содержит 29 рисунков и 13 таблицы.

Введение. Рассмотрена актуальность исследования, сформулированы цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава. Автором проанализирована научно-техническая литература, отражающая современное состояние работ в области измерения теплопроводности. Рассмотрены различные варианты экспериментального исследования теплофизических свойств. Проведен анализ существующей литературной информации и сделан вывод об

ограниченности опубликованных данных. В главе аргументирован выбор коаксиальных цилиндров, описаны объекты исследования (хлоридные и фторидные системы с церием) и методы измерения удельной изобарной теплоёмкости.

Во второй главе описаны методики очистки исходных солей и синтеза безводного трихлорида церия. Приводятся способы приготовления солевых смесей, а также детальное описание конструкции установки для измерения теплопроводности и методики определения теплоёмкости. Кроме того, рассмотрены и учтены возможные источники погрешностей и выполнен расчёт погрешности измерений.

Третья глава представляет экспериментальные данные по коэффициентам удельной и молярной теплопроводности трихлорида церия и его смесей с хлоридами щелочных металлов, растворов трифторида церия в эвтектической смеси FLiNaK. В главе анализируется температурные и концентрационные зависимости, оценивается радиационный вклад в теплоперенос и влияние аниона на молярную теплопроводность расплавов.

Четвёртая глава посвящена определению изобарной теплоёмкости расплавленных солевых смесей трифторида церия в эвтектической смеси FLiNaK. Предложено эмпирическое уравнение для расчёта теплоёмкости хлоридных расплавов на основе их молярной массы.

В **пятой главе** представлены расчёты и анализ коэффициентов температуропроводности для всех исследованных хлоридных и фторидных систем. Описана взаимосвязь температуропроводности с температурой и составом расплава.

Вопросы и замечания по работе:

1. Цель диссертационной работы – установление взаимосвязи изобарной теплоёмкости, теплопроводности и температуропроводности расплавленных солевых смесей $CeCl_3$–MCl (где M = Li, Na, K, Rb, Cs) и (1-n) FLiNaK–n CeF_3 (n = 0–0,30 мольных долей) с их ионным составом и **структурой**. В вопросе взаимосвязи свойств со структурой расплава информация в работе минимальна.
2. В работе недостаточно обоснован выбор объектов исследования. Считаем, что использование ионов Ce^{3+} в качестве имитатора плутония необоснованно с теплофизической точки зрения ввиду различия их молекулярных масс.
3. В качестве конструкционного материала для измерительной ячейки в зоне контакта с расплавом использовали никель, а не платину. Происходила ли коррозия никеля после проведения длительных экспериментов в образцах? Из работы не ясна продолжительность эксперимента? Кроме того, при продолжительном эксперименте с расплавами хлоридов и фторидов выше точки

плавления происходит возгонка солей. Учитывалось ли влияние уменьшения массы расплава в ходе эксперимента на измеряемые физико-химические свойства?

4. Какие эксперименты по структуре можно привлечь к объяснению теплофизических свойств расплавов? Как экспериментальные данные соотносятся с привлечёнными моделями солевых смесей?
5. В литературном обзоре отмечена возможность образования 7-9 координированных ионов Ce^{3+}. В каких расплавах они возможны?
6. Входной контроль солевых смесей в диссертационной работе и автореферате был осуществлён методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК). В то же время на диаграммах присутствует кривая ДСК и ТГ (термогравиметрии). Считаем, что корректно применять аббревиатуру одновременно ДСК и ТГ – синхронно-термический анализ (СТА).
7. Почему в качестве эталона при измерении теплоёмкости расплавов был использован лейкосапфир? Чем обусловлен выбор этого эталона? По методологии измерения эталон и образец должны находиться в одном агрегатном состоянии.
8. В эпоху развития компьютерного моделирования в работе приводится лишь скромный ссылочный материал на расчетное подтверждение взаимосвязи структуры расплавов с их физико-химическими свойствами. В работе нет сравнения полученных теплофизических характеристик с данными, полученными методами компьютерного моделирования.
9. В тексте встречаются стилистические и смысловые ошибки.

Замечания являются дискуссионными и не снижают значимость полученных в работе результатов.

Общее заключение

Диссертационная работа Кеслер Ксении Олеговны на тему «Теплофизические свойства расплавленных галогенидных смесей, содержащих хлорид и фторид церия» является законченной научно-квалификационной работой. В работе получены новые экспериментальные сведения о влиянии температуры, катионно-анионного состава на теплофизические свойства (теплопроводность, теплоёмкость и температуропроводность) галогенидных расплавов, содержащих соединения церия, что имеет существенное значение для физической химии расплавленных солевых смесей.

Автореферат кратко отражает основное содержание диссертационной работы, сохраняя ее структуру и описывая главные научные результаты. По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК для

публикации результатов диссертационных работ. Публикации достаточно полно излагают основные положения работы. Результаты исследований прошли апробацию на профильных всероссийских и международных конференциях.

Диссертационная работа по объёму, уровню проведённых исследований, актуальности, научной и практической значимости соответствует требованиям пп. 9–11, 13,14 «Положения о присуждении учёных степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Кеслер Ксения Олеговна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата химических наук по специальность 1.4.4. Физическая химия.

Отзыв составлен по результатам обсуждения диссертационной работы Кеслер Ксении Олеговны «Теплофизические свойства расплавленных галогенидных смесей, содержащих хлорид и фторид церия» и утверждён на расширенном семинаре лаборатории металлургических расплавов Института металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения Российской академии наук (протокол №1 от 13.01.2026 г.).

Ведущий научный сотрудник
лабораторией неупорядоченных систем
Института металлургии имени академика Н.А. Ватолина
Уральского отделения Российской академии наук,
доктор химических наук _____ Куликова Татьяна Владимировна

Старший научный сотрудник
лабораторией металлургических расплавов
Института металлургии имени академика Н.А. Ватолина
Уральского отделения Российской академии наук,
кандидат химических наук _____ Пайвин Алексей Сергеевич

«13» января 2026 г.

Подпись Куликовой Т.В. и Пайвина А.С. заверяю,
Ученый секретарь Института металлургии
имени академика Н.А. Ватолина
Уральского отделения Российской академии наук,
кандидат химических наук П.В. Котенков

Адрес 620016, г. Екатеринбург,
ул. Амундсена, д.101;
тел.: (343)267-91-24
E-mail: imet.uran@gmail.com
https://www.imet-uran.ru