

На правах рукописи

Стручалин Павел Геннадьевич

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЭЛОВ С
ПЛОТНЫМ ТОПЛИВОМ РЕАКТОРОВ С ТЯЖЕЛЫМ
ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ**

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование,
эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



Москва 2019

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный	Харитонов Владимир Степанович
руководитель:	кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплофизика» НИЯУ МИФИ, г. Москва
Официальные	Ватулин Александр Викторович
оппоненты:	доктор технических наук, АО ВНИИНМ им. А.А. Бочвара», г. Москва

Дельнов Валерий Николаевич
доктор технических наук, доцент, АО «ГНЦ РФ-
ФЭИ им. А.И. Лейпунского», г. Обнинск

Забудько Людмила Михайловна
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник, Частное учреждение «ИТЦП»
«ПРОРЫВ», г. Москва

Защита состоится «12» февраля 2020 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета «МИФИ.01.03» НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <https://ds.mephi.ru>.

Автореферат разослан « » 20 г.

Просим принять участие в работе совета и прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь Диссертационного совета
к.т.н.



Куликов Е.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Комплексное решение задач развития ядерной энергетики, связанных с повышением безопасности реакторных установок и эффективности топливоиспользования, а также с переработкой облученного ядерного топлива возможно при замыкании ядерного топливного цикла и применении реакторов на быстрых нейтронах. Реализация данной модели развития ядерной энергетики предполагает разработку реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем и твэлами с плотным ядерным топливом, в которых для снижения максимальных температур рассматривается возможность создания жидкометаллического подслоя между топливным сердечником и оболочкой.

Для обоснования работоспособности твэлов с плотным топливом в течение топливной кампании требуются данные по совокупности их теплофизических характеристик, среди которых наибольшее значение имеют теплопроводность топлива и термическое сопротивление зазора между топливом и оболочкой.

К настоящему времени накоплен значительный объем информации по теплопроводности необлученного плотного ядерного топлива, к которому относятся нитридное, карбидное и металлическое ядерное топливо. Данные различных авторов показывают, что теплопроводность плотного топлива сильно зависит от технологии его изготовления, пористости и стехиометрии. Данные о влиянии выгорания на теплопроводность плотного топлива немногочисленны, но, опираясь на опыт эксплуатации оксидного топлива, следует ожидать изменения теплопроводности и у плотного топлива за счет накопления продуктов деления и появления дефектов в его структуре.

Определить расчетными методами изменение теплопроводности плотного ядерного топлива в процессе его работы в активной зоне с приемлемой для практических целей точностью невозможно. Единственным способом получения надежных данных остается экспериментальное исследование. Однако разработанные к настоящему времени методы не адаптированы к измерениям теплопроводности плотного ядерного топлива с выгоранием, что подтверждает актуальность работ по их созданию.

Данные о термическом сопротивлении между топливом и оболочкой также немногочисленны и, в своем большинстве, получены на моделях плоского контакта необлученного оксидного топлива и оболочечного материала. Имеющиеся результаты не позволяют утверждать в полной мере об их соответствии реальным термическим сопротивлениям в твэле.

Термическое сопротивление области контакта топлива и оболочки зависит от их упруго-прочностных и теплофизических свойств, шероховатостей поверхностей, действующих взаимных нагрузок и состава газа под оболочкой. Информация об изменении всех перечисленных параметров с выгоранием остается неизвестной, что не позволяет оценить величину термического сопротивления с необходимой точностью.

Таким образом, получить надежные данные по термическому сопротивлению между топливом и оболочкой в твэле с выгоранием возможно лишь в экспериментальных исследованиях, выполняемых без разрушения твэла. Методы, позволяющие проводить такие исследования на твэлах с плотным топливом, в настоящее время отсутствуют, что подтверждает актуальность работы по ее созданию.

Улучшение теплового контакта между топливом и оболочкой является важной задачей при разработке твэлов с плотным нитридным топливом, поскольку при температурах свыше 1000 °С нитридное топливо испытывает интенсивное газовое распухание. Добиться снижения температуры топлива позволяет создание жидкометаллического подслоя между топливом и оболочкой, возможными материалами которого для твэлов реакторов на быстрых нейтронах являются свинец и его сплавы. Определить эффективность применения жидкометаллического подслоя невозможно без данных о теплопроводности рассматриваемых расплавов, а также о термическом сопротивлении контакта жидкого металла с поверхностями топлива и оболочки. Планируемое использование свинцового теплоносителя в реакторах на быстрых нейтронах дополнительно подчеркивает актуальность получения надежных данных по теплопроводности свинца.

Вместе с тем, при анализе литературных данных по теплопроводности свинцового теплоносителя было отмечено существенное расхождение данных разных авторов. Практически отсутствует информация о термическом сопротивлении на границе теплоотдающей поверхности и тяжелого жидкого металла.

Упомянутое выше подтверждает актуальность создания методов и проведения измерения теплопроводности свинца и его сплавов, а также исследования термического сопротивления контакта жидкого металла с поверхностями топлива и оболочки.

Целью работы является определение комплекса теплофизических характеристик твэлов с плотным топливом реакторов с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи.

- разработан метод неразрушающего исследования теплопроводности топлива и термического сопротивления между топливом и оболочкой в твэлах с плотным ядерным топливом;
- измерена теплопроводность имитаторов топлива и термического сопротивления между имитаторами и оболочкой в составе макета тепловыделяющего элемента с помощью разработанного метода неразрушающего исследования теплопроводности топлива и термического сопротивления между топливом и оболочкой в твэлах;
- разработан метод исследования теплопроводности жидких металлов;
- измерена теплопроводность свинца, а также сплавов на его основе;
- разработан метод исследования термического сопротивления контакта теплопередающей поверхности и жидкого металла;
- измерено термическое сопротивление контакта теплопередающей поверхности и жидкого металла.

Научная новизна работы.

1. Разработан новый экспериментальный метод неразрушающих измерений теплопроводности плотного топлива и термического сопротивления между топливом и оболочкой в тепловыделяющем элементе. Метод основан на бесконтактной регистрации изменения температуры фронтального и тыльного участков внешней поверхности оболочки твэла, вызванного тепловым воздействием импульса лазерного излучения, с последующим использованием значений характерных интервалов времени роста и спада температуры на термограммах для определения искомых теплофизических свойств.

2. Измерены температурные зависимости по теплопроводности жидкого свинца С1, а также впервые измерены температурные зависимости коэффициента теплопроводности сплавов Pb-2,3% Mg, Pb-2,3% Mg-Zr, Pb-1,4% Mg, являющихся кандидатными материалами жидкометаллического подслоя в твэлах с плотным топливом с помощью нового разработанного экспериментального метода исследования теплопроводности расплавов тяжелых жидких металлов, основанного на регистрации термограммы поверхности измерительной ячейки с исследуемым расплавом, подвергаемой импульсному нагреву лазером.

3. Впервые измерены температурные зависимости термического сопротивления контакта свинца С1 и сплавов Pb-2,3% Mg, Pb-2,3% Mg-Zr, Pb-1,4% Mg со сталями ЭП823 и Х18Н10Т с помощью нового разработанного метода измерения контактного термического сопротивления между расплавом тяжелого жидкого металла и теплоотдающей поверхностью, который также основан на регистрации

термограммы поверхности измерительной ячейки с исследуемым расплавом, подвергаемой импульсному нагреву лазером.

Практическая значимость работы.

1. Разработанный метод неразрушающих измерений теплопроводности топлива и термического сопротивления между топливом и оболочкой при реализации в условиях защитной камеры позволяет определять влияние выгорания на теплопроводность топлива и термическое сопротивление между топливом и оболочкой в твэлах с плотным топливом.

2. Измеренные температурные зависимости по теплопроводности прототипа свинцового теплоносителя, а также сплавов Pb-2,3% Mg, Pb-2,3% Mg-Zr, Pb-1,4% Mg, являющихся кандидатными материалами жидкометаллического подслоя твэлов с плотным топливом, с помощью разработанного метода измерения коэффициента теплопроводности жидких металлов, могут быть использованы при проведении научно-исследовательских работ, связанных с обоснованием работоспособности создаваемых реакторных установок, использующих перечисленные жидкие металлы, а также эффективности применения жидкометаллического подслоя в твэлах с плотным топливом. Разработанный метод может быть использован при проведении измерений теплопроводности других жидких металлов.

3. Впервые измеренные температурные зависимости термического сопротивления контакта жидкого свинца, а также сплавов Pb-2,3% Mg, Pb-2,3% Mg-Zr, Pb-1,4% Mg с конструкционными сталями с помощью разработанного метода измерения контактного термического сопротивления между теплоотдающей поверхностью и жидким металлом, могут быть использованы при обосновании эффективности применения жидкометаллического подслоя в твэлах с плотным топливом для реакторов на быстрых нейтронах.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Экспериментальный метод неразрушающих измерений теплопроводности плотного топлива и термического сопротивления зазора между топливом и оболочкой тепловыделяющего элемента.

2. Измеренные температурные зависимости теплопроводности расплавов свинца марки С1 и Pb-2,3% Mg, Pb-2,3% Mg-Zr, Pb-1,4% Mg.

3. Экспериментальный метод измерения теплопроводности расплавов жидких металлов.

4. Измеренные температурные зависимости термического сопротивления контакта расплавов свинца С1 и Pb-2,3% Mg, Pb-2,3% Mg-Zr, Pb-1,4% Mg со сталями ЭП823 и X18Н10Т.

5. Экспериментальный метод измерения термического сопротивления между расплавом жидкого металла и теплоотдающей поверхностью.

Достоверность научных положений, результатов и выводов.

Достоверность данных, получаемых с помощью разработанных методов, подтверждается согласованием результатов проведенных тестовых измерений теплофизических свойств веществ с опубликованными и прецизионными справочными данными, данными других исследователей, а также с расчетными рекомендациями. При проведении экспериментов использовалось современное сертифицированное и высокоточное оборудование.

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийских и международных конференциях и школах:

- 3-я, 4-я, 5-я, 6-я Международная молодежная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий» (НИЯУ МИФИ, г. Москва, 2014 – 2017 г.г.);
- 13-я Международная школа-конференция «Новые материалы – Жизненный цикл материалов: старение и деградация материалов в процессе эксплуатации ЯЭУ» (Москва, 2016 г.);
- Конференции по теплофизике реакторов нового поколения (Теплофизика-2014, -2015, -2018) (ГНЦ РФ-ФЭИ, г. Обнинск, 2014, 2015, 2018 г.г.);
- Научные сессии НИЯУ МИФИ-2013, -2014, -2015 (НИЯУ МИФИ, г. Москва, 2013 – 2015 г.г.);
- 14-й Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ, (КНИТУ, г. Казань, 2014 г.);
- 11-й Курчатовской молодежной научной школе (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, 2013 г.)

Публикации.

По материалам диссертационной работы опубликовано десять статей, шесть из которых опубликованы в журналах, входящих в международные базы данных Web of Science и Scopus, четыре - в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Личное участие автора.

Постановка целей и задач исследования проведена совместно с научным руководителем. Разработка и расчетно-теоретическое обоснование экспериментальных методов, а также измерения, обработка, анализ и обобщение экспериментальных данных выполнены автором самостоятельно. Создание экспериментального оборудования – установки по измерению теплопроводности топлива и термического сопротивления между топливом и оболочкой, измерительных ячеек для расплавов жидких металлов (совместно с к.ф.-м.н. Кругловым А.Б. и к.т.н. Кругловым В.Б.)

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 106 наименований. Работа изложена на 127 страницах, содержит 45 рисунков и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность работы, сформулирована цель и задачи исследования, кратко описаны полученные результаты.

Первая глава диссертации посвящена обзору имеющихся данных по теплофизическим характеристикам тепловыделяющих элементов: теплопроводности плотного топлива, термического сопротивления между топливом и оболочкой, теплопроводности жидких металлов, термическому сопротивлению контакта расплава жидкого металла и теплопередающей поверхности. Проведенный анализ показывает, что в настоящее время информация о теплопроводности облученного плотного топлива недостаточна. В опубликованной литературе отсутствуют данные о термическом сопротивлении между плотным топливом и оболочкой твэлов реакторов на быстрых нейтронах. Отмечено отсутствие данных по теплопроводности сплавов свинца с магнием и цирконием, являющихся кандидатными материалами жидкометаллического подслоя в твэлах с плотным топливом, а также то, что контактные термические сопротивления жидких металлов с теплоотдающими поверхностями изучены недостаточно. В данной главе также рассмотрены основные методы экспериментального исследования перечисленных теплофизических свойств и указаны их основные недостатки. В результате выполненного анализа подтверждена актуальность данной работы и обоснован выбор целей и задач исследования, направленного на разработку методов исследования теплофизических свойств твэлов с плотным топливом.

Во второй главе изложены результаты разработки неразрушающего метода исследования теплопроводности топлива λ_t и термического сопротивления r_t между топливом и оболочкой в тепловыделяющих элементах с плотным топливом.

Разработанный метод основан на измерении и анализе изменения избыточной температуры (1) оболочки твэла $\theta(\tau)$ в процессе ее локального нагрева на участке диаметром 1-2 мм импульсом лазерного излучения и после его завершения:

$$\theta(\tau) = \frac{(T(\tau) - T_0)}{(T_{max} - T_0)}, \quad (1)$$

где $T(\tau)$, T_0 и $T_{\max}$ – текущая, начальная и максимальная температуры оболочки.

При проведении измерений (рисунок 1) осуществляется регистрация термограммы нагреваемого лазером участка и термограммы диаметрально противоположного фрагмента оболочки (рисунок 2).

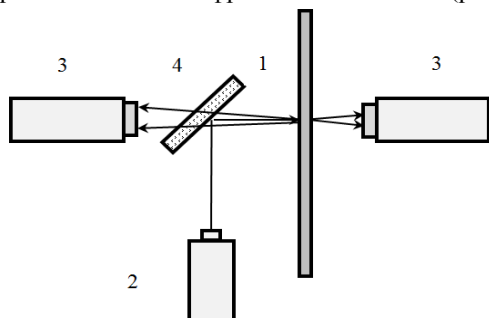


Рисунок 1 – Схема неразрушающих измерений r_T и λ_T :
1 – твэл; 2 – лазер; 3 – пирометр; 4 – селективное зеркало

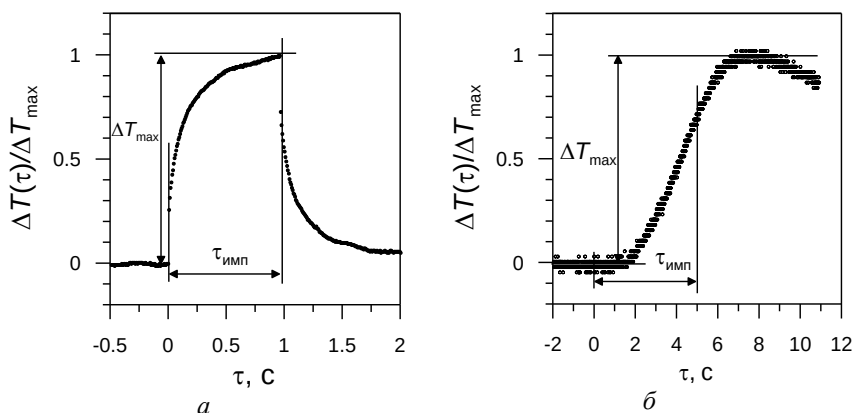


Рисунок 2 – Термограммы участка нагрева оболочки твэла (а) и ее диаметрально противоположной области (б)

Теплофизические характеристики твэла – r_T и λ_T – закономерно связаны с формой регистрируемых термограмм и в разработанном методе определяются в итерационной процедуре подгонки нормированных термограмм области нагрева оболочки $\theta_T(\tau)$ и диаметрально противоположной точки $\theta_\lambda(\tau)$, полученных расчетным ($\theta_{Tp}(\tau)$, $\theta_{\lambda p}(\tau)$) и экспериментальным ($\theta_{Tэ}(\tau)$, $\theta_{\lambda э}(\tau)$) способами. Согласование термограмм достигается путем варьирования r_T и λ_T до совпадения с точностью не хуже 1 мс временных характеристик термограмм τ_T и τ_λ (рисунок 3).

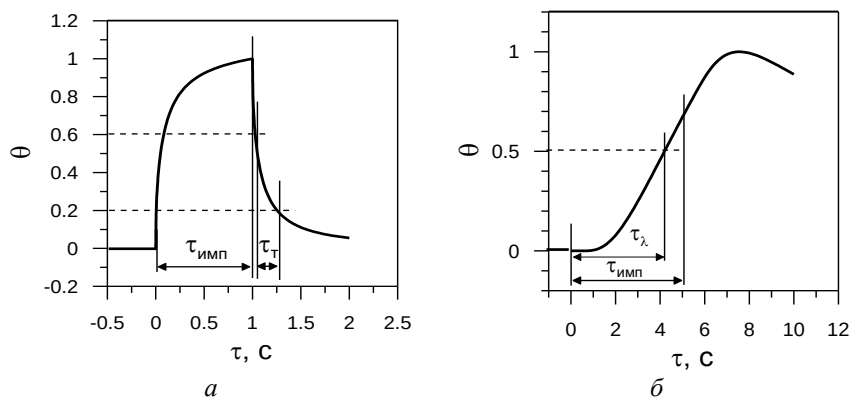


Рисунок 3 – Характерные интервалы времени для термограмм участка нагрева оболочки (а) и диаметрально противоположной точки (б)

Интервал $\tau_{\text{т}}$ – время, за которое происходит снижение температуры области нагрева оболочки θ_1 от значения $0,6\theta_{\text{max}}$ до $0,2\theta_{\text{max}}$ после прекращения действия импульса лазера. Интервал $\tau_{\text{л}}$ – время роста температуры θ_2 диаметрально противоположного фрагмента оболочки до $0,5\theta_{\text{max}}$ с момента начала воздействия импульса лазера на твэл.

При проведении численного расчета рассматривается фрагмент тепловыделяющего элемента (рисунок 4), для которого осуществляется решение нестационарной задачи теплопроводности (2 – 6) в условиях теплового действия импульса лазера.

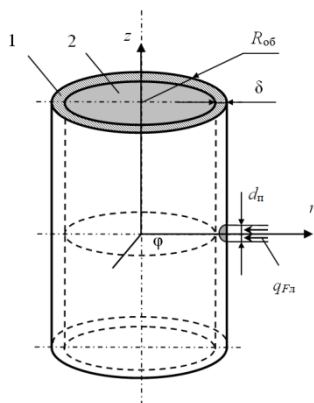


Рисунок 4 – Фрагмент твэла: 1 – оболочка; 2 – топливный стержень

$$\rho_{т,об} c_{т,об} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{т,об} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right), \quad (2)$$

$$T_{т,об}(\tau = 0) = T_0, \quad (3)$$

$$-\lambda_{об} \frac{dT}{dn} \Big|_{r=\frac{d_{об}}{2}} = -\sigma \varepsilon (T_{об}^4 - T_0^4) - \alpha (T_{об} - T_0) + q_{Фл}, \quad (4)$$

$$q_{Фл} = \begin{cases} \frac{4Q\varepsilon}{\tau_{имп} \pi d_{п}^2}, |z| \leq \frac{d_{п}}{2}, \varphi \leq \arctg \left(\frac{d_{п}}{d_{об}} \sqrt{1 - \frac{2z}{d_{п}}} \right), \tau \leq \tau_{имп}, \\ 0, \tau > \tau_{имп}, \end{cases} \quad (5)$$

$$-\lambda_{об} \frac{dT}{dn} \Big|_{r=\frac{d_{об}}{2}-\delta} = -\lambda_{т} \frac{dT}{dn} \Big|_{r=\frac{d_{об}}{2}-\delta} = \frac{T|_{(\frac{d_{об}}{2}-\delta)+0} - T|_{(\frac{d_{об}}{2}-\delta)-0}}{r_{т}}. \quad (6)$$

Здесь – $\rho_{т,об}$, $c_{т,об}$, $\lambda_{т,об}$ – плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность топлива и оболочки соответственно, $r_{т}$ – термическое сопротивление между топливом и оболочкой, $d_{об}$ – внешний диаметр оболочки твэла, δ – толщина оболочки твэла, $d_{п}$ – диаметр луча лазера, ε – степень черноты поверхности оболочки, α – коэффициент теплоотдачи с внешней поверхности оболочки, $q_{Фл}$ – поверхностная плотность тепловой энергии, падающая на оболочку в результате действия на него лазером, Q – энергия в импульсе лазера, $\tau_{имп}$ – время действия импульса лазера.

Проверка работоспособности метода осуществлялась в два этапа на специально разработанной установке. На первом этапе проводилось измерение теплопроводности однородных цилиндрических образцов из стали X18H10T и монокристалла урана для проверки соответствия метрологических характеристик используемого оборудования условиям измерений. Результаты данных измерений совместно с известными справочными данными приведены на рисунках 5 и 6, где также указана относительная погрешность измерений, составившая 7% для образцов из стали X18H10T и 10% для UN.

Необходимые для проведения численного расчета теплофизические свойства образцов – теплоемкость и ТКЛР – были получены в отдельной серии экспериментов на установках LFA-457 и DIL-402 C (X18H10T) или заимствованы из справочной литературы.

На втором этапе, для проверки работоспособности метода в целом, были проведены измерения теплопроводности имитаторов топлива и термического сопротивления между имитаторами и оболочкой на трех

макетах тепловыделяющих элементов, основные характеристики которых приведены в таблице 1. Макеты твэлов заполнялись гелием, либо аргоном.

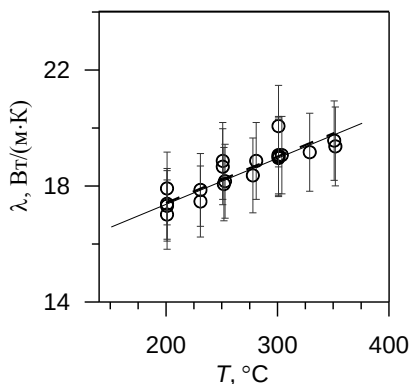


Рисунок 5 – Теплопроводность цилиндрического образца стали X18H10T:

○ - экспериментальные данные;
 - - - - - интерполирующая зависимость;
 ——— - данные ГСССД 165-94

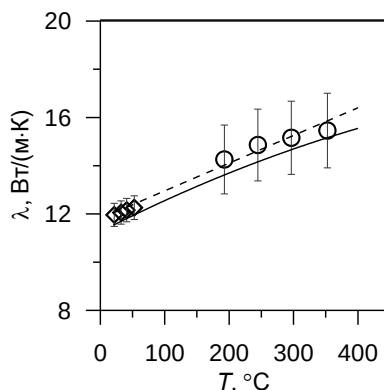


Рисунок 6 – Теплопроводность цилиндрического образца UN:

◇ - измерения методом стационарного осевого потока;
 ○ - измерения в радиальном направлении;
 - - - - - интерполирующая зависимость;
 ——— - расчетные значения для UN с пористостью 0,107

Таблица 1 – Характеристики макетов твэлов

№	Øоболочки, мм	Оболочка	Имитатор топлива	Зазор, мм
1	8,1	X18H10T	X18H10T	0,04
2	9,4	ЭК-164	X18H10T	0,05
3	9,2	X18H10T	UN	0.03

Результаты измерений на макетах твэлов представлены на рисунках 7 – 9.

Из представленных рисунков видно, что предложенный метод позволяет измерить коэффициент теплопроводности топлива в твэле и термического сопротивления между топливом и оболочкой без разрушения твэла. Относительная погрешность измерения теплопроводности имитаторов топлива составила 12%, измерения термического сопротивления топливом и оболочкой – 35%.

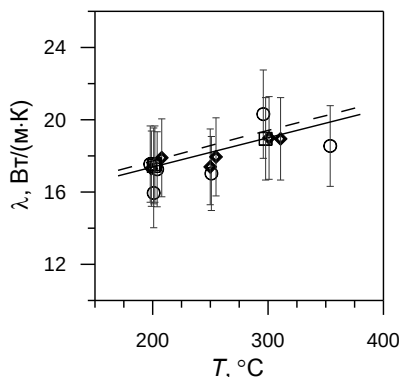


Рисунок 7 - Теплопроводность имитатора из ст. X18H10T в составе макета
 №1: ○ - He, ◆ - Ar;
 №2: □ - He;
 — - измерения LFA-457;
 --- - ГСССД 165-94

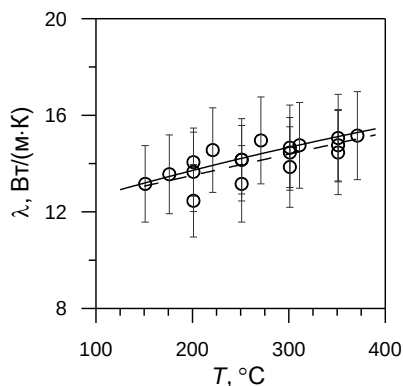


Рисунок 8 - Теплопроводность имитатора из UN в составе макета №3:
 ○ - экспериментальные данные;
 --- - интерполирующая зависимость;
 — - расчетная теплопроводность UN с пористостью 0,107

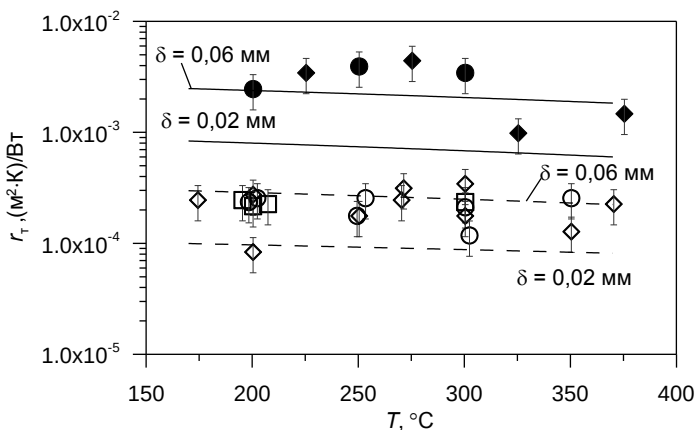


Рисунок 9 - Термическое сопротивление зазора между имитатором топлива и оболочкой в макетах твэлов, заполненного инертными газами:
 №1: ○ - He; ● - Ar; №2: □ - He; №3: ◇ - He; ◆ - Ar;
 расчетный диапазон r_T при заполнении зазора: --- - He; — - Ar

В **третьей главе** описан метод измерения теплопроводности расплавов жидких металлов импульсным методом на установке NETZSCH LFA-457 (рисунок 10) с использованием измерительной ячейки из стали X18Ni10T (рисунок 11), содержащей исследуемый расплав.

При проведении измерений осуществляется импульсный нагрев доньшка тигля измерительной ячейки импульсом лазера и регистрация термограммы верхней поверхности крышки ячейки инфракрасным детектором.

Определение теплопроводности расплава осуществляется с помощью оригинального метода путем сравнения функций $Y^*(\tau)$ и $Y_3(\tau)$, построенных, соответственно, для начального участка длительностью 80-140 мс расчетной (7) и экспериментальной (8) термограмм поверхности крышки:

$$Y^*(\tau) = \ln([T^*(\tau) - T^*(0)] \cdot \sqrt{\tau}) = C^* \cdot \tau^{-1} + A, \quad (7)$$

$$Y_3(\tau) = \ln([U(\tau) - U(0)] \cdot \sqrt{\tau}) = C_3 \cdot \tau^{-1} + B, \quad (8)$$

где T^* – расчетная температура поверхности крышки, $U(\tau) = cT_{\text{п}}(\tau)$ – сигнал ИК-детектора, $T_{\text{п}}$ – температура поверхности крышки в эксперименте, c – коэффициент пропорциональности.

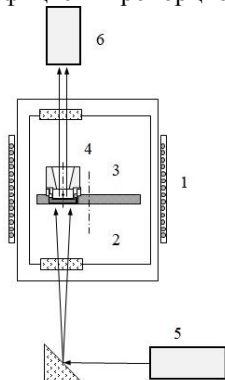


Рисунок 10 – Схема LFA457:
1 – печь; 2 – рабочий объем;
3 – поворотный диск;
4 – измерительная ячейка;
5 – лазер; 6 – ИК-детектор

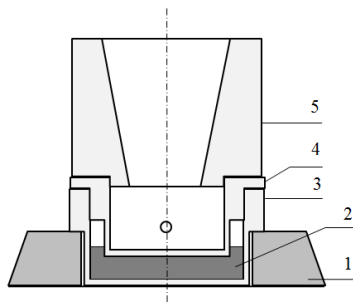


Рисунок 11 – Измерительная ячейка:
1 – поворотный диск LFA 457;
2 – жидкий металл; 3 – тигель;
4 – крышка тигля; 5 – груз

Построение расчетной термограммы крышки измерительной ячейки, формируемой в процессе протекания теплового процесса под воздействием импульса лазера, осуществляется путем решения

нестационарной задачи теплопроводности (9)–(12) для геометрии измерительной ячейки (рисунок 12).

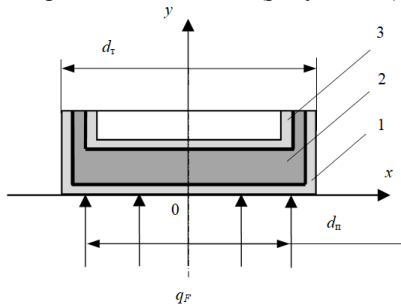


Рисунок 12 – Расчетная область измерительной ячейки с расплавом
1 – тигель; 2 – расплав; 3 – крышка

$$\rho_i c_i \frac{dT}{d\tau} = \lambda_i \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (9)$$

$$-\lambda_\tau \frac{dT}{dn} \Big|_{y=0} = q_F, |x| \leq 0,5 \cdot d_\pi, 0 < t \leq \tau_{\text{имп}}, \quad (10)$$

$$-\lambda_i \frac{dT}{dn} = -\sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4) - \alpha (T - T_0) \quad (11)$$

$$T(\tau = 0) = T_0, \quad (12)$$

В уравнениях (9)–(12) ρ_i , c_i , λ_i – соответственно, теплопроводность, удельная теплоемкость и теплопроводность i -й компоненты расчетной области (тигля, расплава или крышки), q_F – тепловой поток, создаваемый импульсом лазера на части поверхности дна тигля, ограниченной окружностью диаметром d_π ; λ_τ – теплопроводность материала тигля, d_π – диаметр пятна лазера.

Коэффициенты C^* и C_3 в (7) и (8) зависят от термического сопротивления слоя вещества, заключенного в ячейке между поверхностями доньшка и крышки и, следовательно, от теплопроводности расплава λ_p . Однако, при измерениях в эксперименте к термическому сопротивлению самого слоя расплава $r_p = \delta_p / \lambda_p$ добавляются термические сопротивления границ контакта расплава с внутренними поверхностями доньшка и крышки ячейки r_τ . В предложенном методе для исключения (минимизации) влияния r_τ на результат измерения теплопроводности расплава применяется предварительная подготовка измерительной ячейки, которая позволяет улучшить смачивание поверхностей ячейки расплавом и, как следствие, уменьшить контактные термические сопротивления между слоем расплава и поверхностями измерительной ячейки. Подготовка включает в себя последовательность из нагревов ячейки до $T = 400^\circ \text{C}$ и охлаждения до $T = 25^\circ \text{C}$ в вакууме ($p = 5 \text{ Па}$), что позволяет

удалить из ячейки адсорбированные газы, и последующую выдержку ячейки в атмосфере аргона (ВЧ, 99,998 %) при температуре $T = 550 - 900$ °С. Осуществление данной процедуры позволяет снизить контактные термические сопротивления r_t до значений меньших 10^{-6} (м²·К)/Вт, которые не оказывают влияния на результаты измерений коэффициента теплопроводности расплава.

Зависимость коэффициентов C^* и C_3 в (7) и (8) от термического сопротивления слоя расплава r_p позволяет определить теплопроводность расплава λ_p . Рассчитав C_3 по экспериментальной термограмме, теплопроводность расплава найдем из условия (13) варьированием значения теплопроводности расплава λ_p^* в расчете.

$$C^*(\lambda_p^*) = C_3. \quad (13)$$

С помощью разработанного метода проведены измерения теплопроводности свинца марки С1, являющегося наиболее близким аналогом свинцового теплоносителя; а также сплавов Pb-2,3% Mg, Pb-2,3% Mg-Zr, Pb-1,4% Mg, применение которых возможно в качестве материалов теплопроводящего жидкометаллического подслоя в твэлах с плотным ядерным топливом.

Зависимости, обобщающие результаты измерений теплопроводности свинца и его сплавов приведены в таблице 2 и на рисунках 12 – 13, на рисунке 13 приведено сравнение результатов измерения теплопроводности свинца С1 с опубликованными данными других авторов. Видно, что результаты проведенных измерений согласуются с большинством отобранных для сравнения работ. Наилучшее согласование наблюдается результатами измерений теплопроводности свинца С00 (№8, 9, рисунок 14), предварительно подвергнутого высоковакуумной очистке и который наиболее близок по составу к свинцу С1, исследованному в настоящей работе. Относительная погрешность проведенных измерений составила $\pm 7\%$.

Таблица 2 - Теплопроводность свинца С1 и его сплавов

Вещество	λ , Вт/(м·К)(T , °С)
Pb (C1)	$0,0127T + 13,14$
Pb+1,4%Mg	$7.46 + 0.024 \cdot T - 4.94 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
Pb+2,3%Mg-Zr	$6.82 + 0.028 \cdot T - 9.46 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$
Pb+2,3%Mg	$5.66 + 0.028 \cdot T - 8.49 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$

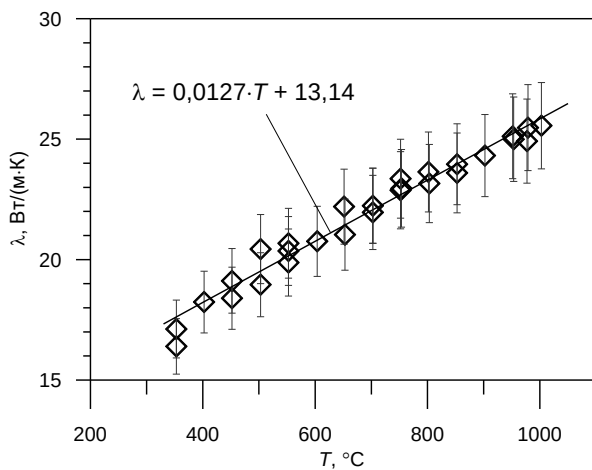


Рисунок 12 – Теплопроводность свинца C1:

◇ - экспериментальные значения; ——— - интерполирующая зависимость

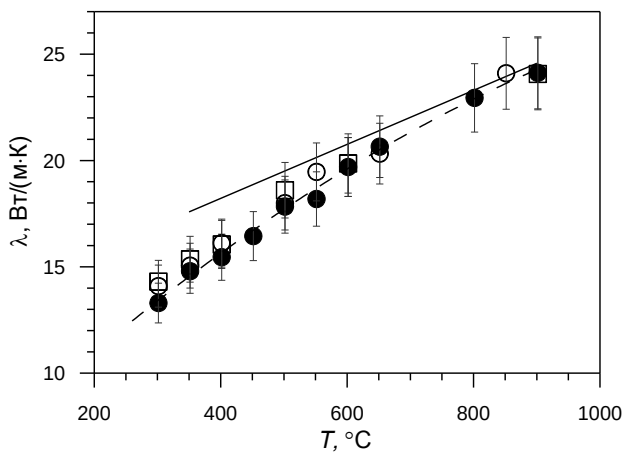


Рисунок 13 - Теплопроводность сплавов свинца:

□ - Pb-2,3%Mg-Zr; ○ - Pb-1,4%Mg; ● - Pb-2,3%Mg;
 - - - - интерполяция теплопроводности сплавов Pb-Mg-Zr;
 ——— - теплопроводность свинца C1

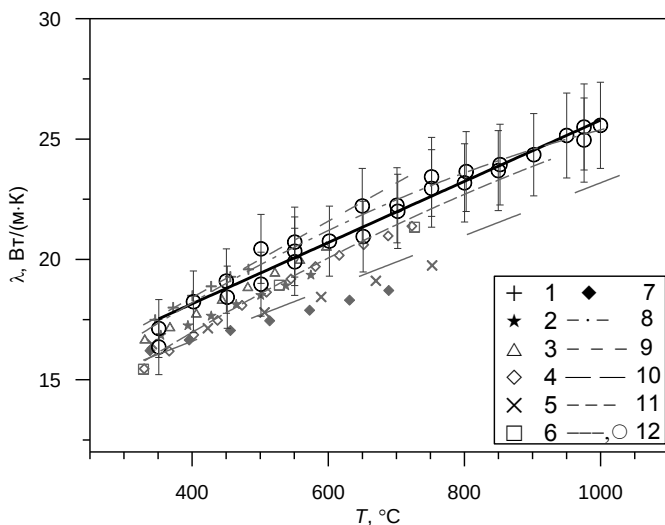


Рисунок 14 – Теплопроводность свинца C1:

1 – Rosenthal (1952); 2 – Dutchak (1966); 3 – Осипенко (1970);
 4 – Touloukian (1970); 5 – Смирнов (1974); 6 – Zinoviev (1989);
 7 – Sklyarchuk (2005); 8 – Савченко (2011); 9 – Савченко (2013);
 10 – OECD/NEA. Handbook on lead-bismuth eutectic alloy and lead
 properties (2007); 11 – зависимость Видемана-Франца; 12 – настоящая
 работа

В четвертой главе описан метод исследования контактного термического сопротивления между расплавом жидкого металла и теплоотдающей поверхностью импульсным методом. Данный метод, также как и метод определения теплопроводности расплава жидкого металла, основан на анализе начального участка термограммы измерительной ячейки, содержащей расплав жидкого металла, подвергаемой импульсному нагреву лазером.

Термограмма импульсного нагрева измерительной ячейки, использовавшейся в измерениях теплопроводности расплавов жидких металлов, зависит от термического сопротивления трехслойной системы «доньшко – расплав – крышка», в которое вносят вклад и термические сопротивления контактов расплава с поверхностями доньшка и крышки r_{τ} . Таким образом, если предварительно провести измерения теплопроводности расплава свинца λ_p , то в последующих измерениях, в которых не используется специальная подготовка измерительной ячейки,

описанная в главе 3, можно определить термическое сопротивление границ контакта расплава r_T с материалом измерительной ячейки.

Метод определения термического сопротивления r_T контакта расплава и теплоотдающей поверхности основан на совместной обработке с помощью выражений (7) – (8) начальных участков экспериментальной и расчетной термограммы внешней поверхности крышки измерительной ячейки, полученной в процессе импульсного нагрева. Коэффициенты C^* и C_s в (7) и (8) зависят от суммарного термического сопротивления трехслойной системы «донышко – расплав – крышка». В случае, если известны термические сопротивления донышка и крышки ячейки, а также расплава, то варьирование r_T в численном расчете позволяет добиться выполнения условия (14):

$$C^*(r_T) = C_s \quad (14)$$

и, тем самым, установить значение термического сопротивления между расплавом и теплоотдающей поверхностью в измерительной ячейке.

При проведении численных расчетов решалась нестационарная задача теплопроводности - распространения тепла в измерительной ячейке под действием импульса лазера. Данная задача описывается в системе измерительной ячейки (рисунок 12) уравнениями (9) – (12) с дополнительным условием наличия термического сопротивления r_T на границе контакта расплава и поверхностей ячейки (15):

$$-\lambda_{яч} \frac{dT_{яч}}{dn} = -\lambda_p \frac{dT_p}{dn} = \frac{T_{яч\ гр} - T_{p\ гр}}{r_T}, \quad (15)$$

где $\lambda_{яч}$, λ_p – теплопроводность материала ячейки и расплава соответственно, $T_{яч\ гр}$, $T_{p\ гр}$ – температуры ячейки и расплава на границе их контактирования.

С помощью данного метода проведено исследование контактного термического сопротивления между расплавами свинца и его сплавов Pb-2,3% Mg, Pb-2,3% Mg-Zr, Pb-1,4% Mg со сталями X18H10T и ЭП823, результаты которого представлены на рисунках 15 - 17.

Измеренные установившиеся величины термического сопротивления границы контакта расплава жидких металлов и поверхности сталей показывают, что оно сопоставимо с термическим сопротивлением слоя расплава, толщиной 0,1 – 0,2 мм. Рассматривая слой жидкого свинца ($\lambda = 20,76$ Вт/(мК), $t = 600$ °С) толщиной $\delta = 0,1$ мм, определим его термическое сопротивление, которое составит $\delta/\lambda = r_{Pb} \approx 0,5 \cdot 10^{-5}$ (м²·К)/Вт. В свою очередь полученные экспериментальные данные по термическому сопротивлению контакта расплава свинца со сталями X18H10T и

ЭП823 находятся в пределах $r_T \approx (0,4 \div 1) \cdot 10^{-5} (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$, что приводит к выводу о значительном вкладе термического сопротивления границ контакта расплава с теплопередающими поверхностями в общее термическое сопротивление жидкометаллического подслоя.

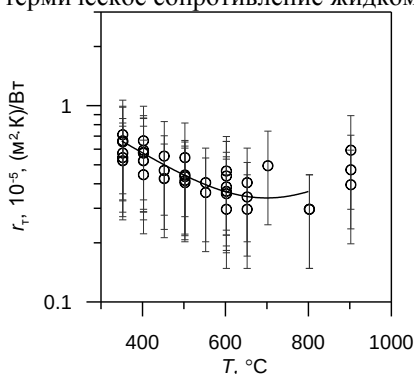


Рисунок 15 - Термическое сопротивление границы контакта свинца С1 и стали ЭП823:
○ – экспериментальные значения;
---- - интерполирующая зависимость

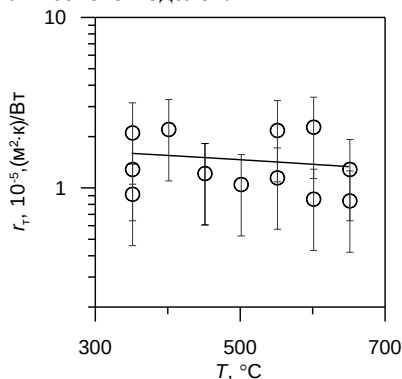


Рисунок 16 - Термическое сопротивление границы контакта сплавов Pb-Mg-Zr и стали ЭП823:
○ - экспериментальные данные;
---- - интерполирующая зависимость

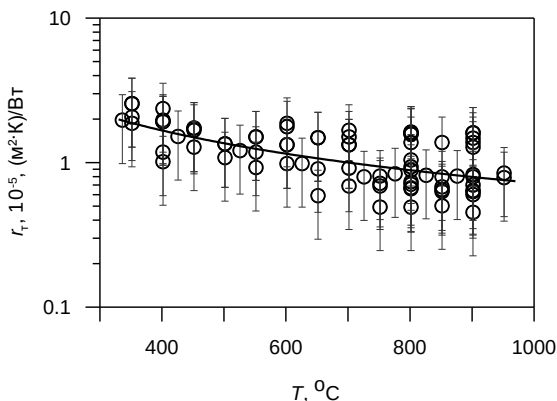


Рисунок 17 - Термическое сопротивление границы контакта свинца С1 и стали X18N10T:
○ - экспериментальные данные;
---- - интерполирующая зависимость

На оптическом и электронном микроскопах проведено исследование состояния поверхности стали ЭП823 и X18N10T после отделения от нее кристаллизованного свинца. Анализ ее снимков позволяет предположить, что основная часть поверхности, доля которой составляет $\varepsilon_T \geq 0,95$, была окислена и отделена от свинца прослойкой адсорбированного на ней газа.

В то же время на стальной поверхности имеются пятна окислов свинца, прочно связанных со сталью. В пределах этих пятен поверхность стали была смочена и свинец со сталью находились в непосредственном контакте. Анализируя диаграммы состояния систем «Fe – O», «Pb – O», «Fe – Pb» можно предположить, что в проведенном эксперименте наблюдалось образование оксида железа Fe_3O_4 с частичным проникновением в него свинца, что и являлось причиной формирования участков прочной связи свинца и стальной поверхности.

На основании анализа снимков поверхности стали предложена модель теплового контакта расплава свинца и стальной поверхности, представленная на рисунке 18.

В модели термическое сопротивление структурной единицы площади контакта определяется термическим сопротивлением пятен контакта r_k , а также термическим сопротивлением газовой прослойки r_g с относительной долей в площади контакта ε_g . В таком случае, термическое сопротивление контакта свинца и стали r_T может быть оценено по формуле (16):

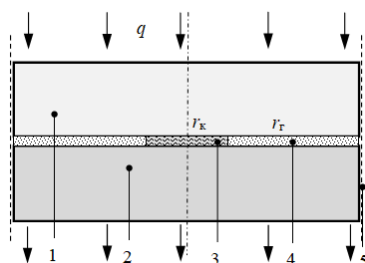


Рисунок 18 - Структурная единица контакта свинца и стали:

1 - свинец; 2 – сталь; 3 - пятна локального смачивания; 4 – прослойка газа; 5 – адиабатная граница структурной единицы контакта.

$$r_T = \frac{r_k \cdot r_g}{(1 - \varepsilon_g) \cdot r_T + \varepsilon_g \cdot r_k}, \quad (16)$$

Результаты экспериментального исследования термического сопротивления r_T свинца и стали ЭП823 сопоставлены с результатами расчета по формуле (16) и результатами численного решения двумерной задачи теплопроводности на границе контакта свинца и стали. При выполнении расчетов r_k было оценено как термическое сопротивление слоя оксида свинца и стали, толщиной ~ 1 мкм ($r_k \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт}$), а величины r_g и ε_g варьировались. Диапазон величин r_g в расчете ограничен значениями $10^{-6} \div 10^{-5} \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт}$, что соответствует оценке термического сопротивления слоя адсорбированных газов толщиной $\sim 50 \div 500$ нм. Результаты расчетов приведены на рисунке 19.

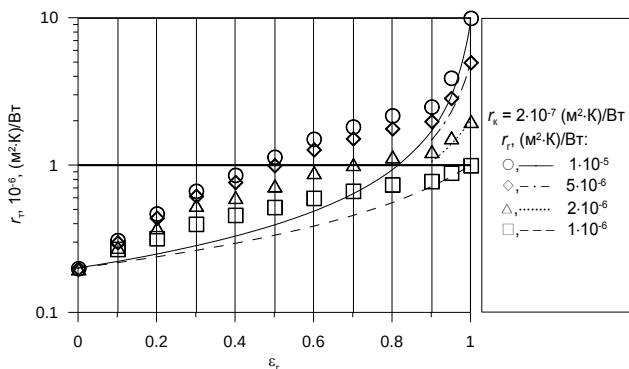


Рисунок 19 – Термическое сопротивление контакта стали и свинца r_t при локальном смачивании свинцом неокисленной поверхности стали: точки - численный расчет; линии - расчет по формуле (16)

Таким образом, для доли поверхности стали $\varepsilon_r \geq 0,95$, покрытой слоем адсорбированных газов, получим расчетное значение $r_t = (0,4 \div 2) \cdot 10^{-5} \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$, что согласуется с экспериментальными значениями для контакта свинца и стали ЭП823, полученными в данной работе.

Основные выводы

1. Разработан новый экспериментальный метод исследования теплофизических характеристик тепловыделяющих элементов с плотным топливом, позволяющий проводить измерения теплопроводности топлива, а также термического сопротивления между топливом и оболочкой в твэлах неразрушающим способом. Работоспособность метода продемонстрирована с помощью созданной лабораторной установки на макетах тепловыделяющих элементов. Полученные значения по теплопроводности материалов имитаторов топлива в макете и термическому сопротивлению их контакта с материалом оболочки согласуются с известными литературными данными и расчетными оценками.

2. Получена новая температурная зависимость коэффициента теплопроводности свинца марки С1 в диапазоне температур 350 – 1000 °С, а также впервые температурная зависимость сплавов Pb+2,3%Mg-Zr, Pb+1,4%Mg, Pb+2,3%Mg с помощью разработанного метода измерения коэффициента теплопроводности расплавов жидких металлов по начальному временному участку экспериментальной термограммы измерительной ячейки с расплавом, подвергнутой тепловому воздействию

импульса лазерного излучения. Обоснован температурный режим подготовки измерительной ячейки к измерениям, обеспечивающий исключение влияния контактного термического сопротивления на границе теплоотдающей поверхности ячейки и расплава жидкого металла.

3. Впервые измерены температурные зависимости термического сопротивления контакта расплава свинца С1 и сплавов Pb+2,3%Mg-Zr, Pb+1,4%Mg, Pb+2,3%Mg со сталями ЭП823 и Х18Н10Т с помощью разработанного нового метода измерения термического сопротивления границы контакта стали и жидкого металла, основанного на анализе начального участка термограммы поверхности измерительной ячейки, содержащей расплав жидкого металла, полученной в процессе ее импульсного нагрева лазером.

Проведенные оценки показывают, что вклад термического сопротивления контакта жидкого металла и теплопередающей поверхностью в полное термическое сопротивление жидкометаллического подслоя в твэле может достигать величин до 60%.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Неразрушающая методика измерений теплофизических свойств твэлов с плотным топливом / Круглов А. Б., Круглов В. Б., Харитонов В. С., Стручалин П. Г. // ВАНТ. Серия: ядерно-реакторные константы, выпуск 4, 2018г., с. 147 – 152;
2. Методика исследования термического сопротивления контакта жидкого металла и теплопередающей поверхности / Круглов А. Б., Круглов В. Б., Харитонов В. С., Стручалин П. Г. // ВАНТ. Серия: ядерно-реакторные константы, выпуск 4, 2018г., с. 141 – 146;
3. Non-destructive methods of control of thermo-physical properties of fuel rods /Kruglov A.B., Kruglov V.B., Struchalin P.G., et al. // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 781 (2017);
4. Теплопроводность сплава Pb-Mg в диапазоне температур 300–650 °С / Круглов А. Б., Круглов В. Б., Харитонов В. С., Стручалин П.Г., и др.// ВАНТ. Серия: ядерно-реакторные константы, выпуск 4, 2016г., с. 27 – 29;
5. Тепловые характеристики твэла со свинцово-магниевым подслоем /Орлова Е.А., Круглов А.Б., Чуваев Д.В., Стручалин П.Г., и др. // Вант. Серия: ядерно-реакторные константы, выпуск 4, с. 95 – 98, 2016;
6. Thermal Conductivity of Pb-Mg-Zr Alloys and the Thermal Resistance of the Interface Between Alloys and EP-823 Steel in the Temperature Range of 300-900 °C / Kruglov A. B., Kruglov V. B., Struchalin P. G.; Kharitonov V. S. et al. // Bulletin of the Lebedev Physics Institute, Volume 43, Issue 10, p. 302-305, 2016;
7. Study of Thermophysical Properties of EP-823 Steel in the Temperature Range of 200–900 °C / Kruglov A.B., Kruglov V.B., Struchalin P. G. Kharitonov V.S. // Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2015, Vol.42, No. 9 p. 264 – 267;
8. Technique for Measuring Liquid Lead Thermal Conductivity at 350–1000°C/ Kruglov A. B., Kruglov V. B., Rachkov V. I., Struchalin P. G., et al. //High Temperature, Vol. 53, No. 4, pp. 564–568, 2015;
9. Development of Techniques of Nondestructive Testing of Thermal Properties of Fuel Elements with Dense Fuel / Kruglov A.B., Kruglov V.B., Struchalin P.G., Kharitonov V.S., Bulletin of the Lebedev Physics Institute, Volume 41, Issue 7, May 2014, pp. 192-195.