

Круглов Виктор Борисович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ
ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете
«МИФИ»

Научный руководитель: кандидат технических наук
Харитонов Владимир Степанович, НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Рощупкин Владимир Владимирович, главный
научный сотрудник ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова
кандидат физико-математических наук
Евдокимов Игорь Анатольевич,
начальник лаборатории ГНЦ РФ ТРИНИТИ

Ведущая организация: ОАО ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара

Защита состоится 02 марта 2011 года в 16 час. 30 мин. на
заседании диссертационного совета Д 212.130.04 в НИЯУ МИФИ
по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан 25 января 2011 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенном печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор



Чернов И.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. К настоящему времени проведен большой объем работ по экспериментальному определению теплофизических свойств (ТФС) ядерного топлива и твэлов ядерных энергетических установок (ЯЭУ), накоплен обширная информация по температуропроводности диоксида урана для выгораний до 65 МВт·сут/кг U. Данные по теплоемкости, полученные путем прямого измерения для отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), более скудные и характеризуются большой погрешностью. В большей степени это обусловлено трудностями при работе с радиоактивным материалом и в меньшей степени несовершенством методик измерения. Исследования необходимо проводить в петлях исследовательских реакторов, в защитных камерах и боксах. В таких условиях подготовка и проведение теплофизических измерений – трудоемкий процесс, который является частью комплексного исследования, поэтому применяемые методики должны быть надежны и достоверны.

Создание измерительного комплекса «Квант – Б», предназначенного для исследования температуропроводности материалов ядерной техники до температур 1650 °С, потребовало развития метода определения температуропроводности с использованием импульсного лазерного нагрева. Необходимо было создать аппаратуру для реализации метода и получить методику, применимую для широкого спектра материалов, которую можно было включить в программное обеспечение обработки экспериментальных данных.

Совершенствование технологии изготовления топлива и твэлов для реакторов на быстрых нейтронах подразумевает использование виброуплотненного топлива и топлива на основе инертных матриц, что, в свою очередь, определяет необходимость разработки метода определения ТФС твэлов, изготовленных по таким технологиям. Разрабатываемые методы должны позволять, в том числе, оценивать изменение ТФС отработавшего топлива.

Развитие новых технологий по производству ядерного топлива из диоксида урана (введение легирующих добавок, использование ультрадисперсных фракций) приводит к необходимости проведения измерений теплопроводности при температурах 80–340 К. В этом диапазоне теплопроводность и теплоемкость чувствительны к вводимым примесям и структурным особенностям материалов. Данные по новым материалам в этой области температур отсутствуют.

Таким образом, развитие методов теплофизического исследования ядерного топлива является актуальным направлением исследований.

Цель работы. Целью работы явилось теоретическое обоснование и разработка нестационарных методов определения теплофизических свойств ядерного топлива на основе импульсного нагрева.

Для достижения цели решены следующие задачи.

1. Разработана и создана аппаратура для реализации метода импульсного лазерного нагрева.
2. Разработан метод определения температуропроводности материалов ядерной техники импульсным методом с учетом влияния утечек тепла при высоких температурах и конечной длительности лазерного импульса.

3. Проведена проверка предлагаемого метода путем измерения температуропроводности материалов с известной температуропроводностью, в том числе в области высоких температур для диоксида урана.
4. Разработан метод экспериментального определения теплоемкости и ТФС твэлов энергетических реакторов ВВЭР и БН.
5. Проведены исследования теплопроводности втулок ядерного топлива из диоксида урана с добавками ультрадисперсных фракций в интервале температур 80–340 К.

Научная новизна работы

1. Разработан и создан измерительный комплекс «Квант - Б», предназначенный для определения температуропроводности МОХ топлива и материалов ядерной техники.
2. Разработан метод определения температуропроводности материалов ядерной техники путем нагрева образцов лазерным импульсом с учетом конечной длительности импульса и утечек тепла. Эффективность метода проверена для ряда материалов в интервале температур 400–1650 °С.
3. Впервые предложен, теоретически и экспериментально обоснован метод определения теплоемкости, температуропроводности, тепловой проводимости границы топливо – оболочка твэлов энергетических реакторов без их разрушения в ходе эксперимента. Метод может быть применен в условиях горячей камеры.
4. Впервые проведены измерения теплопроводности втулок ядерного топлива из диоксида урана с добавками ультрадисперсных фракций в интервале температур 80–340 К и установлено, что использование ультрадисперсных фракций при изготовлении ядерного топлива позволяет производить образцы с теплопроводностью, которая соответствует теплопроводности диоксида урана, изготовленного по традиционной технологии.

Практическая ценность работы. Полученные в ходе работы рекомендации имеют практическую ценность. Результаты теоретического и экспериментального исследования, представленные в работе, используются в ОАО ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара на установке «КВАНТ - Б» для определения температуропроводности активных образцов ядерного топлива (акт ОАО ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара от 07.12.2010г.). Экспериментальный метод определения ТФС твэлов энергетических реакторов может быть применен на установке НИИАР. Результаты измерений теплопроводности и теплоемкости образцов из UO_2 с ультрадисперсными добавками используются для отработки технологии производства в ОАО ВНИИХТ. По результатам разработки экспериментального метода определения ТФС твэлов энергетических реакторов подготовлена лабораторная работа на кафедре теплофизики НИЯУ МИФИ.

Достоверность полученных результатов подтверждается тарировочными измерениями, сравнением экспериментальных и теоретических результатов с данными других авторов.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработанный экспериментальный метод определения температуропроводности материалов ядерной техники импульсным методом с учетом влияния утечек тепла при высоких температурах и конечной длительности импульса тепла.
2. Результаты проверки разработанного метода определения температуропроводности материалов ядерной техники на материалах с различной теплопроводностью.
3. Разработанный экспериментальный метод определения ТФС стержневых ТВЭЛов энергетических реакторов.
4. Результаты измерений теплопроводности втулок ядерного топлива из диоксида урана с добавками ультрадисперсных фракций в интервале температур 80–340 К.

Личный вклад автора. Работа выполнена на кафедре теплофизики НИЯУ МИФИ. Постановка задач исследований проведена автором самостоятельно.

Разработку метода определения температуропроводности материалов ядерной техники импульсным методом с учетом влияния утечек тепла при высоких температурах и конечной длительности импульса тепла автор провел самостоятельно.

Экспериментальная часть диссертации, связанная с измерениями температуропроводности импульсным методом, была выполнена в сотрудничестве с коллегами из НИЯУ МИФИ, НИИ «Полюс», ОАО ВНИИНМ им. А. А. Бочвара, лаборатории «Пиролаб» ОИВТ РАН.

Экспериментальный метод определения ТФС ТВЭЛов ЯЭУ автор разработал самостоятельно.

Измерения теплопроводности образцов диоксида урана с ультрадисперсными добавками проведены автором на кафедре теплофизики НИЯУ МИФИ. Образцы для исследования были подготовлены в ОАО ВНИИХТ и лаборатории ОНИЛ–724 НИЯУ МИФИ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 52 наименований и приложения. Текст работы изложен на 111 страницах, содержит 34 рисунка и 9 таблиц.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на XII Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ (7–10 октября 2008 г., Москва, Россия); научной сессии МИФИ 2005, 2007, 2009 г.г.; VIII Всероссийской конференции «Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем» (2009 г., Москва, Россия), IX Российской конференции по реакторному материаловедению (14–18 сентября 2009 г., Димитровград, Россия).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ в научных журналах и сборниках трудов Российских конференций и семинаров, в том числе 4 публикации в журналах, рекомендованных ВАК.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования теплофизических свойств ядерного топлива и твэлов; сформулированы цель работы и решаемые задачи, указаны новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Изучение методов определения ТФС ядерного топлива и твэлов, известных из литературы, показало, что получение наиболее полной информации возможно при развитии нестационарных методов определения теплофизических свойств. В области температур до 1000 °С необходимо проводить измерения на твэлах или их фрагментах без нарушения целостности изделия. Измерения ТФС в высокотемпературной области оптимально проводить на небольших образцах. В процессе разработки новых технологий производства ядерного топлива необходима информация о ТФС в области криогенных температур. В связи с этим, и в соответствии с целью работы и поставленными задачами:

1. Разработан метод учета длительности лазерного импульса в методе Паркера для образцов с высокой теплопроводностью и учета утечек тепла при высоких температурах. Разработанный метод проверен экспериментально.

2. Разработан метод определения теплоемкости топливного сердечника для твэлов энергетических реакторов без их разрушения и сформулирован метод определения ТФС твэлов.

3. Проведены систематические измерения ТФС ядерного топлива, разрабатываемого с применением новых технологий, в области криогенных температур и показана практическая ценность таких результатов.

Разработка импульсного метода определения теплопроводности материалов

Развитие метода импульсного лазерного нагрева возможно при решении следующих задач.

1. Разработка и создание приборного и аппаратного обеспечения экспериментальной установки для измерения теплопроводности.

2. Разработка и создание автоматизированной системы проведения измерений и обработки экспериментальных результатов.

3. Развитие метода измерения теплопроводности путем импульсного нагрева.

4. Создание измерительного комплекса в результате проведения работ по п.п. 1–3 и проведение тестирования его метрологических характеристик на материалах с известной теплопроводностью.

Задача п. 1 заключалась в разработке и изготовлении специализированного лазера и высокочувствительного скоростного пирометра. Работы проводились в рамках НИОКР по созданию метода определения ТФС МОХ топлива. В результате проведения НИОКР разработан и запущен в эксплуатацию комплекс «Квант – Б». Комплекс предназначен для проведения измерений теплопроводности материалов ядерной техники, слабоактивных и токсичных материалов в условиях защитного бокса.

Измерительный комплекс «Квант – Б»

«Квант – Б» (рис. 1) состоит из рабочей камеры в защитном боксе, лазера, быстродействующего пирометра и программы управления измерениями и обработки экспериментальных данных. Процесс измерения температуропроводности полностью автоматизирован. Для повышения точности измерений разработан метод учета теплообмена образца и длительности лазерного импульса.

Рабочая камера установки имеет охлаждаемые водой обечайку и фланцы, изготовленные из коррозионно-стойкой стали. Внутри камеры на внешней поверхности сапфировой трубки установлен проволочный молибденовый нагреватель, теплоизолированный от стенок камеры радиальными и торцевыми молибденовыми экранами. Объем рабочей камеры заполнен смесью аргона и водорода при давлении 80 кПа. Молибденовый нагреватель обеспечивает нагрев образца до температуры 1650 °С.

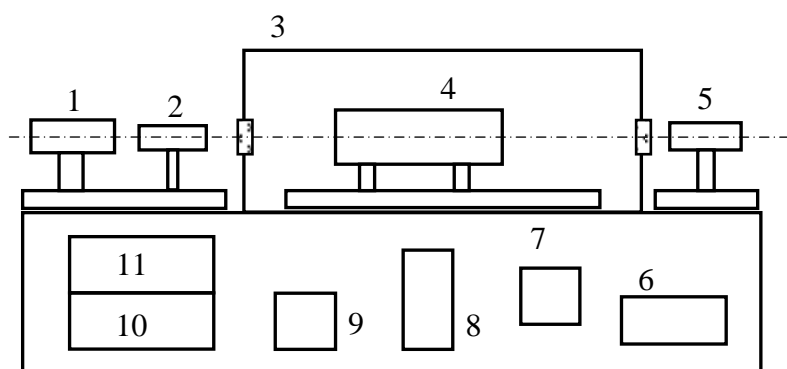


Рис. 1. Схема установки «Квант-Б»:
1 – импульсный лазер;
2 – измеритель энергии импульса;
3 – герметичный бокс; 4 – рабочая камера; 5 – пирометр; 6, 7 – блоки питания и управления нагревом образца; 8, 9 – диффузионный и форвакуумный насосы; 10, 11 – блоки охлаждения и накачки лазера

В качестве источника теплового импульса используется специально разработанный и изготовленный в НИИ «Полюс» для установки «Квант – Б» лазер на кристалле $Al_2O_3:Cr_3^+$ (рубин, легированный ионами Cr_3^+).

Лазер имеет следующие характеристики: длина волны излучения – 694 нм, энергия импульса излучения в номинальном режиме – 5 Дж, длительность импульса излучения (по уровню 50 % интенсивности) – 1,5 мс, диаметр пучка – 10 мм, неравномерность распределения энергии по сечению пучка не более $\pm 5 \%$, разброс энергии в серии из пяти последовательных импульсов не более $\pm 5 \%$.

Запуск импульсов лазера осуществляется в ручном режиме или по команде персонального компьютера (ПК).

Стабильность энергии импульса обеспечивается применением в конструкции излучающей головки прямого охлаждения активного элемента водой. Температура охлаждения поддерживается при помощи специального блока охлаждения с теплообменником вода – вода. Теплоноситель первого контура, непосредственно контактирующий с активным элементом, – обессоленная вода глубокой очистки, в которую добавлено 10 % этилового спирта.

Равномерное распределение энергии по сечению лазерного пучка получено при помощи оптической головки с двумя лампами накачки и отражателя с диффузным отражением из стекла МС-20. Заднее отражающее зеркало имеет

сферическую форму для обеспечения равномерности распределения энергии в пучке.

Регистрация температуры поверхности образца проводится специализированным оптическим микропроцессорным пирометром, разработанным в ОИВТ РАН. Пирометр предназначен для измерения в интервале температур 400÷2000 °С приращений температуры поверхности образца в 2–5 °С с разрешением ±0,1 °С. Калибровка пирометра проводится по «вольфрам–рениевой» термопаре, установленной около образца. Пирометр используется в двух режимах: мониторинга температуры и в режиме регистрации быстрого изменения температуры образца после его нагрева лазерным импульсом.

Программное обеспечение установки «Квант – Б» осуществляет:

- нагрев образца до заданной температуры и его термостатирование;
- запуск импульса лазера;
- регистрацию процесса нагрева образца после импульса лазера;
- обработку полученных термограмм различными методами;
- проведение измерений в автоматизированном режиме по заданной программе эксперимента.

При проведении измерений на установке «Квант – Б» оператор включает вакуумную систему, задает температуры измерений, выбирает методы обработки результатов и включает программу измерений. Далее установка работает в автоматическом режиме. По достижении первой заданной температуры проводится проверка вакуума и показаний контрольных термопар. Если все параметры находятся в установленных пределах, то производится подготовка пирометра, запуск импульса лазера и регистрация подогрева тыльной поверхности образца. Измерения при фиксированной температуре проводятся 3–5 раз.

Модель переноса тепла в цилиндрической таблетке для импульса нагрева конечной длительности и при наличии утечек тепла

Расчетные соотношения с учетом длительности лазерного импульса и утечек тепла получены для малых времен. Полагалось, что существенны утечки тепла только с фронтальной и тыльной поверхности образца. Сформулированные условия и геометрия задачи приводят к нестационарному уравнению теплопроводности в безразмерном виде (1) с граничными условиями (2–3) и начальным условием (4):

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial\Theta / \partial Fo = \partial^2\Theta / \partial y^2, \\ \partial\Theta / \partial y|_{y=0} = -(Fo_n)^{-1} \eta(Fo) + Bi \cdot \Theta, \\ \partial\Theta / \partial y|_{y=1} = -Bi \cdot \Theta, \\ \Theta(0, y) = 0. \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \\ (4) \end{array}$$

где $Fo_{и} = a\tau_{и}/l^2$, $\tau_{и}$ – длительность лазерного импульса; $\eta(Fo) = 1$ при $0 \leq Fo \leq Fo_{и}$, $\eta(Fo) = 0$ при $Fo > Fo_{и}$; $y = x/l$; $Fo = (a\tau)/l^2$; $\Theta = (T - T_0) \cdot (c\rho Fl)/\Delta Q$; a – температуропроводность образца; $Bi = 4\sigma\epsilon T_0^3 l/\lambda$; c, ρ, λ, l – теплоемкость, плотность, теплопроводность и толщина образца, ϵ – приведенная степень черноты поверхности образца; σ – постоянная Стефана – Больцмана; ΔQ – поглощенная образцом энергия; T_0 – температура окружающей среды (начальная температура образца); F – площадь фронтальной и торцевой поверхности образца. Решения уравнений (1–4) получены для трех основных групп материалов:

- высокотеплопроводные материалы – медь, бериллий, керметное ядерное топливо с алюминиевой или медной матрицей ($a \sim 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$);
- материалы со средней теплопроводностью – конструкционные стали, сплавы урана с молибденом и цирконием, ядерное топливо UN, UC ($a \sim 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$);
- оксидное ядерное топливо ($a \sim 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$).

Измерения при импульсе лазера конечной длительности

Высокотеплопроводные материалы

Диапазон рабочих температур высокотеплопроводных материалов, как правило, заключен в интервале 500–1500 К. Для таких материалов влиянием теплообмена излучением можно пренебречь, однако для образцов с малой толщиной необходимо учесть длительность теплового импульса.

Решение уравнений (1–4) проводится методом преобразования Лапласа. Для прямоугольного импульса получим:

$$\Theta(Fo, 1) = \tilde{\Theta}(Fo) - (1 - \eta(Fo_{и})) \tilde{\Theta}(Fo - Fo_{и}), \quad (5)$$

где

$$\tilde{\Theta}(Fo) = \frac{4\sqrt{Fo}}{Fo_{и}} \sum_{n=0}^{\infty} i\Phi^* \left(\frac{2n+1}{2\sqrt{Fo}} \right); \quad (6)$$

$$i\Phi^*(x) = \frac{e^{-x^2}}{\sqrt{\pi}} - x \cdot \text{erfc}(x). \quad (7)$$

Разложив выражение (5) в ряд по малому параметру $Fo_{и}$, получим выражение для $\Theta(Fo, 1)$ при $Fo_{и} < Fo < 0,3$:

$$\Theta(Fo, 1) = \frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot Fo} \cdot e^{-\frac{1}{4Fo}} \left(1 + \frac{Fo_{и}}{4Fo} \left(1 - \frac{1}{2Fo} \right) + \frac{Fo_{и}^2}{8Fo^2} \left(1 - \frac{1}{Fo} + \frac{1}{12Fo^2} \right) \right). \quad (8)$$

Температуропроводность на интервале $Fo_{и} < Fo < 0,3$ определим по экспериментальной термограмме и формуле (8) методом регрессии. Регрессия проводится по двум параметрам: температуропроводности образца a и максимальному подогреву образца $T_m = \Delta Q/(c\rho Fl)$.

Если теплообменом можно пренебречь на интервале $0 < Fo < 1$, то из формулы (5) можно получить следующее выражение для расчета температуропроводности:

$$a = 1,37 \left(1 + 0,561 \frac{\tau_n}{\tau_{1/2}} \right) \frac{l^2}{\pi^2 \tau_{1/2}}, \quad (9)$$

где $\tau_{1/2}$ – время достижения тыльной поверхностью образца половины максимального подогрева.

Материалы со средними значениями теплопроводности

Для материалов со средней теплопроводностью, как и в предыдущем случае, влиянием теплообмена на тепловой процесс при временах $Fo_n \leq Fo \leq 0,3$ можно пренебречь. Температура $\Theta(Fo, 1)$ описывается зависимостью:

$$\Theta(Fo, 1) = \frac{2}{\sqrt{\pi \cdot Fo}} \cdot e^{-\frac{1}{4Fo}} \left(1 + \frac{Fo_n}{4Fo} \left(1 - \frac{1}{2Fo} \right) \right). \quad (10)$$

Утечки тепла излучением при высоких температурах

Оценки, проведенные по формуле (9) для диоксида урана, показывают, что при толщине образца $l \approx 1$ мм импульс лазера длительностью 1,5 мс можно рассматривать как мгновенный. Утечками тепла пренебрегать нельзя. При $y = 1$ решение для $Fo_n < Fo < 0,3$ имеет вид:

$$\Theta(Fo, 1) = 2 \frac{(1 + 2Bi^2 Fo)}{\sqrt{\pi Fo}} e^{-\frac{1}{4Fo}} - 2Bi(2 + Bi + 2Bi^2 Fo) e^{(Bi + Bi^2 \cdot Fo)} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{Fo}} + Bi\sqrt{Fo}\right). \quad (11)$$

Выражение (11) может быть приближенно записано в виде:

$$\Theta(Fo, 1) = 2(1 + 4 Bi Fo) \frac{e^{-\frac{1}{4Fo}}}{\sqrt{\pi Fo}} - 8Bi \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{Fo}}\right). \quad (12)$$

Определение параметра теплообмена Bi

Охлаждение образца ($Fo > 0,5$) происходит в регулярном режиме. Тогда:

$$\Theta(Fo, 1) = A \cdot e^{-\beta_1^2 \cdot Fo}, \quad (13)$$

где $A = \text{const}$, а β_1 – минимальный положительный корень уравнения

$$(\beta^2 - Bi^2) \cdot \operatorname{tg}(\beta) = 2\beta Bi. \quad (14)$$

Значение параметра теплообмена Bi определяется по термограмме охлаждения с помощью выражений (13,14).

Температуропроводность материалов с низкой теплопроводностью может быть определена методом регрессии по начальному участку термограммы ($Fo < 0,3$) с использованием формулы (12) и определенному в том же эксперименте параметру Bi .

Тестирование метода определения температуропроводности материалов ядерной техники

Материалы с высокой теплопроводностью

Измерения проводились на трех образцах из меди М2 различной толщины. Измерение температуры и подогрев образца после импульса лазера проводилось пирометром. Значения температуропроводности образцов, рассчитанные по выражению (9), представлены на рис. 2. Разница вычисленных по формуле (9) и приведенных в справочнике (Чиркин В.С, 1968) значений температуропроводности меди М2 не превосходит 5 %. Необходимо отметить, что наибольшее отклонение температуропроводности, полученное по формуле (9), наблюдается для самого тонкого образца, а для остальных образцов результаты отличаются не более чем на 1 % от справочных данных.

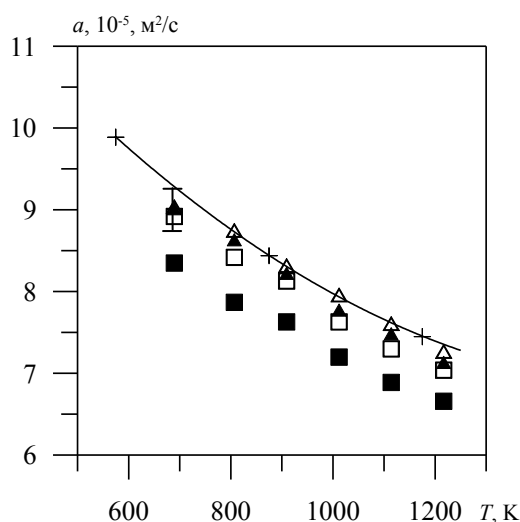


Рис. 2. Результаты измерений температуропроводности образцов из меди: ■, ▲ – расчет по формуле Паркера; □, △ – расчет по формуле (9); +, ——— – справочные данные (Чиркин В.С, 1968). Толщина образцов 3,03 мм (■, □) и 7,10 мм (▲, △)

Материалы со средней теплопроводностью

Материалы со средней теплопроводностью – конструкционные стали, оболочки твэлов, сплавы урана с молибденом и цирконием, ядерное топливо UN, UC. Проверка применимости соотношения (10) проводилась на основании измерений температуропроводности образцов коррозионно-стойкой стали X25H20Ю3Г2СК с известными свойствами, определенными на аналогичной установке в NPL (Национальная физическая лаборатория, Англия). Образцы имели форму дисков диаметром 10 и толщиной 1,5–2 мм. Результаты измерений представлены на рис.3.

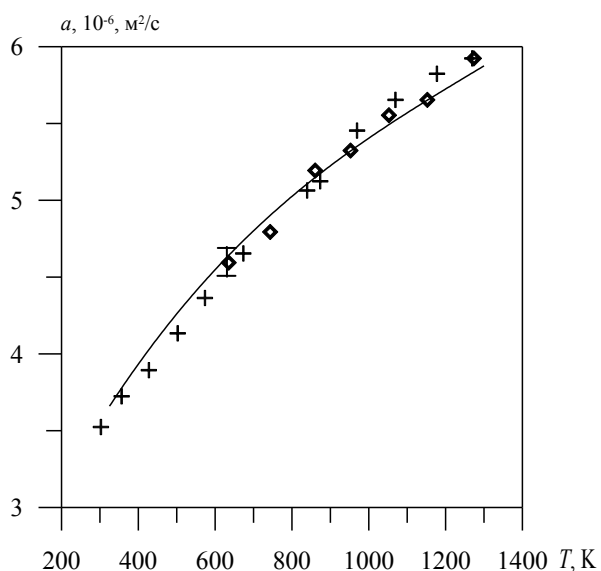


Рис. 3. Температуропроводность стали X25H20Ю3Г2СК: +, ◇ – измерения настоящей работы по термопаре и пирометру; ——— – измерения лаборатории NPL (Англия)

Полученные данные по температуропроводности в пределах погрешности $\pm 5\%$ согласуются с результатами лаборатории NPL.

Измерение температуропроводности оксидного ядерного топлива

Для проверки разработанного метода с учетом утечек тепла при высоких температурах на установке «Квант - Б» были проведены измерения температуропроводности стехиометрического диоксида урана плотностью $\rho = 10362 \text{ кг/м}^3$. Полученные термограммы обрабатывали по разработанной методике, учитывающей тепловые потери с образца. Результаты определения температуропроводности и сравнение с данными (G. Lucuta *et al*, 1992) приведены на рис. 4. Там же для сравнения представлены результаты использования

логарифмического метода обработки (Yutaka Tada *et al*, 1978), который согласуется с экспериментальными данными при температурах $T < 1200 \text{ K}$.

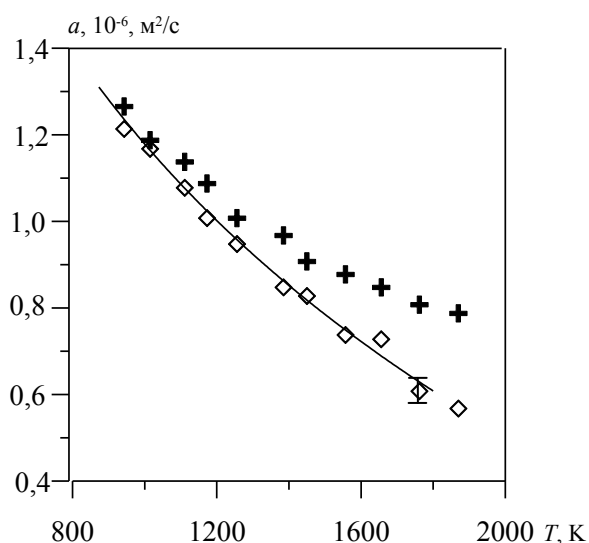


Рис. 4. Температуропроводность диоксида урана: ◇ – обработка экспериментальных результатов по методу автора; — — — — температуропроводность диоксида урана плотностью 95% теоретической плотности (G. Lucuta *et al*, 1992); + – логарифмический метод (Yutaka Tada *et al*, 1978)

Значения температуропроводности, полученные с учетом теплообмена по предложенной методике, хорошо согласуются с общепризнанными данными (G. Lucuta *et al*, 1992). Максимальное отклонение не превосходит $\pm 5\%$.

Определение теплофизических свойств твэлов ЯЭУ

Тепловыделяющие элементы с топливом из диоксида урана в настоящее время используются в энергетических реакторах на тепловых нейтронах и реакторах на быстрых нейтронах. Для надежного прогнозирования работоспособности энергетической ядерной установки необходимы данные по теплофизическим свойствам топлива и тепловыделяющего элемента в целом. Физические процессы, протекающие в топливе работающего реактора, в настоящее время известны. Тем не менее, необходимость в результатах прямых измерений ТФС сохраняет свою актуальность. Возможно также использование виброуплотненного оксидного и МОХ топлива в энергетических ядерных реакторах. Измерение ТФС твэлов с виброуплотненным топливом должно проводиться без разрушения твэла для сохранения структуры топлива и слоя взаимодействия между топливом и оболочкой.

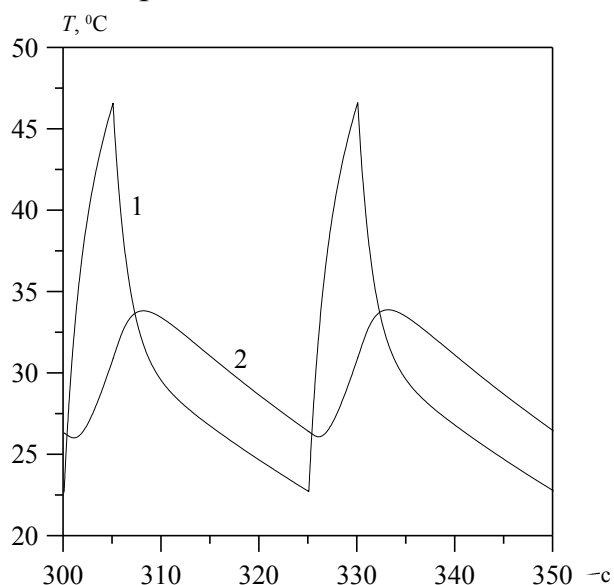
Постановка задачи определения ТФС твэлов ЯЭУ

Задача определения ТФС твэлов энергетических реакторов формулируется следующим образом: определить теплопроводность λ , теплоемкость топлива c , проводимость теплового контакта между топливом и оболочкой α без разрушения твэла, используя только изменение температуры поверхности оболочки при ее нагреве и охлаждении. Свойства оболочки считаются известными. Наиболее информативными для получения сведений о ТФС твэлов являются нестационарные методы. Для твэлов с керамическим топливом (неэлектропроводный топливный сердечник) метод состоит в нагреве оболочки коротким импульсом тока длительностью 0,01 с. По двум характерным временам спада температуры оболочки, например, $\tau_{1/2}$ и $\tau_{1/4}$ (времена уменьшения температуры на 1/2 и 1/4 от максимального значения) находят a и α (Киселев Н.П и др., 1981 г.). Определение температуропроводности топлива и контактной проводимости границы топливо-оболочка возможно, если известно отношение объемных теплоемкостей оболочки и топлива. Таким образом, определение теплоемкости твэла является необходимой составляющей исследования ТФС нестационарными методами.

Определение теплоемкости твэлов энергетических реакторов

Для определения ТФС тепловыделяющий элемент помещался в термостатируемый объем. Оболочка твэла нагревалась импульсами тока. Затем производили регистрацию температуры поверхности оболочки, тепловыделения в ней и температуры термостата.

При нагреве оболочки периодическими импульсами тепла твэл выходит на квазистационарный температурный режим (рис. 5). Температура каждой точки твэла колеблется около средней температуры, общей для всех точек твэла. Из анализа термограммы процесса можно сделать вывод, что твэл охлаждается квазилинейно, скорости охлаждения топлива и оболочки близки и слабо зависят от времени. Отмеченные особенности упрощают решение нестационарной



задачи теплопроводности и позволяют сформулировать метод определения суммарной теплоемкости цилиндрических твэлов энергетических реакторов.

Рис. 5. Изменение температуры оболочки (1) и центра топливной таблетки (2) в квазистационарном режиме (расчет методом конечных элементов для твэла ВВЭР); температура термостата $T_2 = 0$ °С.

Расчетные соотношения

Обозначим $\Theta_0 = T_0 - T_2$ и $\Theta_1 = T_1 - T_2$ (T_0, T_1, T_2 – температура оболочки, топлива, термостата соответственно). Интегрирование уравнения теплопроводности, записанного для оболочки, с весом $2\pi r$ по радиусу и использование условия изотермичности оболочки дает уравнение теплового баланса для единицы длины твэла:

$$C_0 \frac{d\Theta_0}{d\tau} = -2\pi R \alpha_0 \Theta_0 - 2\pi R_m \lambda_1 \frac{\partial \Theta_1(R_m, \tau)}{\partial r} + W_1(\tau), \quad (15)$$

связывающее теплоемкость единицы длины оболочки твэла C_0 с параметрами теплового процесса. В равенстве (15) первое слагаемое в правой части – утечка тепла с единицы длины оболочки к термостату, второе слагаемое – поступление тепла в единицу длины оболочки от топлива, $W_1(\tau)$ – тепловыделение в единице длины оболочки, R – внешний радиус оболочки, R_m – радиус топлива. На участке квазилинейного изменения температуры допущение об изотермичности оболочки позволяет определить тепловой поток от топлива к оболочке. Рассмотрим случай топливной таблетки без центрального отверстия. Для топливной таблетки с центральным отверстием результат получается по тому же алгоритму. Изменение температур задается полиномами. В результате определения Θ_1 и подстановки в уравнение (15) можно получить:

$$C_\Sigma = -2\pi R \alpha_0 \cdot (b_0/b_1) + C_1 R_m^2 (1 + 4/Bi) \cdot (b_2/b_1) / 4a_1, \quad (16)$$

где C_Σ - теплоемкость единицы длины твэла; C_1 – теплоемкость единицы длины топлива; $Bi = \alpha_1 R_m / \lambda_1$. Величины b_0, b_1, b_2 определяются при анализе термограммы остывания оболочки. Данные по теплопроводности топлива и тепловой проводимости контакта топливо – оболочка должны определяться в отдельном измерении. Для твэла ядерного реактора на быстрых нейтронах это нагрев оболочки коротким импульсом тока. При определении теплоемкости твэла методом нагрева периодическими импульсами тока совместно с определением теплопроводности топливного сердечника и тепловой проводимости контакта топливо – оболочка коротким импульсом получается система из трех уравнений для трех неизвестных: C_1, Bi, a_1 , которая решается методом итераций.

Проверка расчетных соотношений

Проверка соотношения (16) проводилась численным моделированием температурных полей в твэлах энергетических реакторов (ВВЭР, БН) методом конечных элементов. На модели твэла реактора ВВЭР с топливными таблетками из диоксида урана без центрального отверстия проведена экспериментальная проверка предложенного метода.

Моделировались поля температур в твэле на квазистационарном участке нагрева. Теплопроводность топлива задавалась в интервале (2–5) Вт/(м·К), тепловая проводимость контакта топливо – оболочка $\alpha_1 = 1,4 \cdot 10^3$ Вт/(м²·К). Коэф-

коэффициент теплоотдачи от поверхности оболочки к термостату α_0 задавался в интервале (50–200) Вт/(м²·К), величина объемного тепловыделения в оболочке $q_v = 5 \cdot 10^6$ Вт/м³.

По рассчитанным термограммам определялись b_0, b_1, b_2 , рассчитывалось C_Σ по соотношению (16) и сравнивалось с величиной C_Σ , которая вычислялась из исходных данных для численной модели. На рис. 6 приведены относительные погрешности определения C_Σ по соотношению (16).

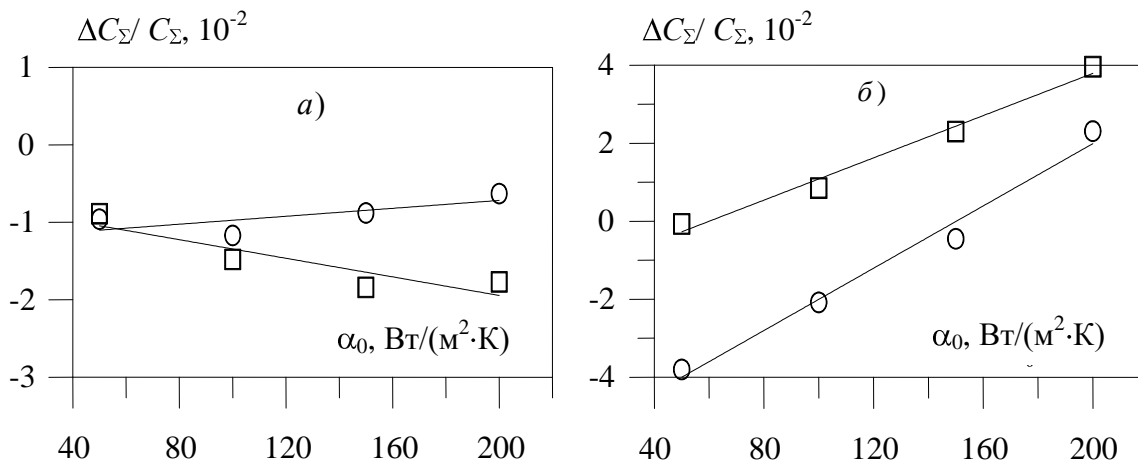


Рис. 6. Относительная погрешность определения C_Σ твэла БН (а) и твэла ВВЭР (б):
 ○ – $\lambda_1 = 2$ Вт/(м·К); □ – $\lambda_1 = 5$ Вт/(м·К)

Относительная погрешность определения C_Σ по формуле (16) не превосходит 2% для твэлов реактора БН и (3–4) % для ВВЭР. Анализ показывает, что погрешность определения C_Σ для твэла реактора ВВЭР может быть уменьшена, если учесть небольшое отклонение температуры оболочки от изотермичности. В этом случае погрешность уменьшится до 2 % .

Метод определения ТФС твэлов реакторов БН

Метод определения ТФС твэлов реакторов БН состоит в комбинации двух измерений. В первом измерении твэл нагревается периодическими импульсами. Измеряется мощность тепловыделения на оболочке, температура оболочки и термостата. По этим данным вычисляется коэффициент теплоотдачи от оболочки к термостату α_0 с использованием равенства

$$W_{cp} = 2\pi R \alpha_0 \Theta_{cp},$$

где W_{cp} и Θ_{cp} – средние за период нагрева мощность тепловыделения в единице длины оболочки и подогрев оболочки относительно термостата. На участке квазилинейного изменения температуры определяются параметры b_0, b_1, b_2 и рассчитывается, в первом приближении, теплоемкость единицы длины твэла по формуле

$$C_{\Sigma 1} = (W_{cp} / \Theta_{cp}) \cdot \frac{b_0}{b_1}. \quad (17)$$

Во втором измерении оболочку нагревают коротким импульсом тока. По термограмме находят характерные времена $\tau_{1/2}$ и $\tau_{1/4}$, и в первом приближении находятся a и Vi . Далее по формуле (16) уточняется значение $C_{\Sigma 2}$ и находятся новые значения a и Vi . Как правило, достаточно двух итераций.

Экспериментальная проверка метода определения теплоемкости

Измерения теплоемкости модельного твэла реактора ВВЭР по изложенному методу были проведены на установке Импульс - П. Установка состоит из исследуемого твэла, помещенного в термостат, управляемого источника напряжения, блока управления источником, персонального компьютера. На оболочку твэла подавались импульсы напряжения прямоугольной формы, заполненные квазисинусоидальным сигналом частотой 50 Гц. Задание параметров импульсов ($\tau_{и} = 1-10$ с; $T_{и} = 1-60$ с) осуществлялось программно с использованием блока управления и ПК. Сигналы термопар оболочки твэла и термостата, падения напряжений на оболочке твэла и образцовом сопротивлении фиксировались в памяти ПК.

Так как для определения свойств топливного сердечника необходимо знать теплоемкость оболочки, то измерения были начаты именно с этого и, одновременно, проверялась работа установки в целом. На оболочку твэла ВВЭР без топливного сердечника длиной 0,5 м подавались одиночный импульс или периодические импульсы, и регистрировалось изменение термоэдс термопары на оболочке во времени, падение напряжения на оболочке и образцовом резисторе. Вычислялась мощность тепловыделения.

Определение теплоемкости оболочки в режиме одиночных импульсов проводилось по соотношениям для калориметра с изотермической оболочкой, при этом можно было определить параметр $2\pi R\alpha_0$, характеризующий утечки тепла. В режиме периодических импульсов теплоемкость определялась по соотношению (17).

Результаты измерения теплоемкости оболочки твэла ВВЭР (сплав Э-110) приведены на рис. 7.

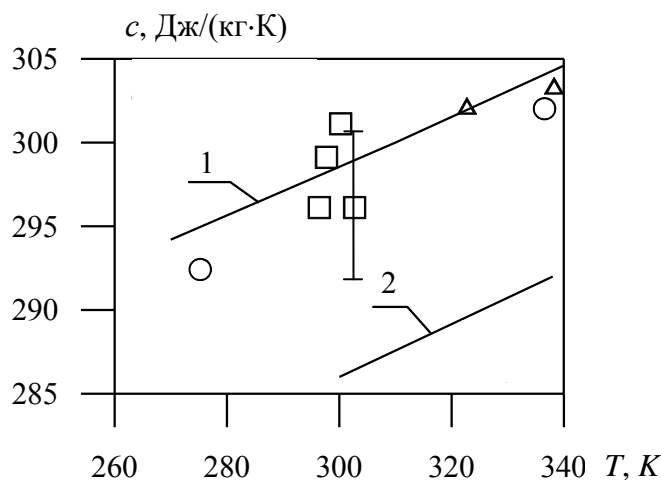


Рис. 7. Теплоемкость сплава Э-110:

1 – (Григорьев В.А., 1982 г.);

2 – (Кириллов П.Л., 2007 г.);

○ – измерения на калориметре с изотермической оболочкой, □ – измерения одиночными импульсами, △ – измерения периодическими импульсами

Теплоемкость материала измерялась независимо в калориметре с изотермической оболочкой (масса образца 3 г) в вакууме. Далее определялась сум-

марная теплоемкость модели твэла ВВЭР, выполненной из сплава Э-110 длиной 0,5 м и заполненной втулками диоксида урана без центрального отверстия. Модель заполнялась гелием при небольшом избыточном давлении. Перед сборкой оболочка и топливные втулки взвешивались.

Плотность втулок из диоксида урана составила 10,4 г/см³. Полученные термограммы периодического нагрева модели твэла обрабатывались по формуле (16). Вычисления теплоемкости топливного сердечника (с использованием ранее измеренной теплоемкости оболочки) дало при температуре 340 К величину $c = 274$ Дж/(кг·К). Следует отметить, что полученная величина теплоемкости диоксида урана хорошо согласуется с данными, приведенными в работе Тенишева А.В (2004 г.) (отклонение не более 2 %), однако лежит несколько выше (на 8 %) рекомендованных МАТПРО значений.

Метод определения ТФС твэлов реакторов ВВЭР

Метод определения теплоемкости твэла при помощи нагрева оболочки периодическими импульсами тепловыделения применим для твэлов реакторов ВВЭР и БН. Нагрев оболочки твэла ВВЭР коротким импульсом тока реализовать трудно, поэтому необходимо предложить экспериментальную процедуру для определения температуропроводности и тепловой контактной проводимости зазора топливо – оболочка. Наибольшая точность определения теплофизических параметров твэла может быть получена при монотонном нагреве оболочки постоянной мощностью тепловыделения в адиабатических условиях. При нагреве оболочки постоянной мощностью тепловыделения через время τ_0 наступает регулярный режим, после которого твэл разогревается с одинаковой скоростью для различных точек твэла.

Постановка задачи

По измеренным термограммам на оболочке и поверхности центрального отверстия топлива при нагреве оболочки постоянной мощностью в адиабатических условиях определить температуропроводность и теплоемкость топливного сердечника, термическую проводимость контакта топливо-оболочка. Для адиабатического нагрева твэла можно получить соотношения:

$$C_{\Sigma} = \frac{Q_1}{\omega}, \quad C_{\Sigma} = C_1 + C_0, \quad (18)$$

$$\chi = \frac{\omega(1-\varepsilon^2)}{2\theta_0} \left[\frac{1}{Bi} + \Psi_0(\varepsilon) \right], \quad \Psi_0(\varepsilon) = \frac{1}{2} \left[1 + 2\varepsilon^2(1-\varepsilon^2)^{-1} \ln \varepsilon \right] \quad (19)$$

$$\chi = \frac{\frac{\omega}{8} \frac{1-\varepsilon^2}{1-\varepsilon^2} \left[1 - \frac{4\varphi_2(Bi)\tilde{\Psi}(\varepsilon)}{1-\varepsilon^2} \right]}{\theta_0 \left[1 - \varphi_1(Bi)\tilde{\Psi}(\varepsilon) + \left(1 - \frac{b_0}{\omega} + 2 \frac{\tau_1}{\Delta\tau} \right) \frac{Q_1}{C_1} \right]}, \quad \tilde{\Psi}(\varepsilon) = -\frac{1}{2} - \frac{\ln \varepsilon}{1-\varepsilon^2}, \quad (20)$$

где $C_0 = 2c_0\rho_0S_0/\Delta\tau$, $C_1 = 2c_1\rho_1S_1/\Delta\tau$ – приведенные теплоемкости единицы длины оболочки и топлива; S_0 и S_1 – площади поперечного сечения оболочки и топлива; Q_1 – тепловыделение в единице длины оболочки; $\varepsilon = r_0/R_m$, r_0 и R_m – радиусы центрального отверстия и топлива; $Bi = \alpha R_m/\lambda_1$, α и λ_1 – термическая проводимость контакта топливо – оболочка и теплопроводность топлива, соответственно; τ_1 , τ_2 – начальное и конечное время выбранного интервала на участке регулярного режима; $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$; $\chi = a\Delta\tau/(2R_m^2)$; a – температуропроводность топлива; $\varphi_1(Bi) = Bi/(1 - Bi)$; $\varphi_2(Bi) = (2 + Bi(1 - \varepsilon^2))/(1 - Bi \ln\varepsilon)$; ω – темп нагрева оболочки и топлива; θ_0 – разность температур между оболочкой и топливом в регулярном режиме; b_0 – температура оболочки в момент времени $(\tau_1 + \tau_2)/2$.

Из уравнений (18) можно определить C_Σ , из системы уравнений (19) и (20) находятся Bi и χ . Необходимые для расчетов параметры θ_0 , ω , b_0 на интервале $[\tau_1, \tau_2]$ определяются по температурам оболочки и топлива на поверхности отверстия на участке регулярного режима при адиабатическом нагреве оболочки твэла постоянной мощностью.

Проверка метода

Термограммы изменения температур оболочки и топлива в отверстии были рассчитаны методом конечных элементов при геометрических размерах и теплофизических параметрах, характерных для твэла ВВЭР. Зазор между оболочкой и топливом заполнен гелием.

Расчетные термограммы нагрева оболочки твэла ВВЭР постоянной мощностью тепловыделения при разных значениях теплопроводности λ топлива приведены на рис. 8.

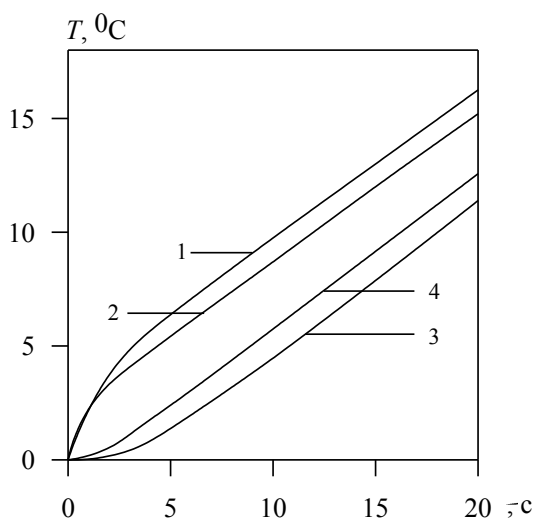


Рис. 8. Изменение температуры оболочки:
 1 – $\lambda_1 = 2$ Вт/(м·К); 2 – $\lambda_1 = 8$ Вт/(м·К);
 изменение температуры поверхности центрального
 отверстия: 3 – $\lambda_1 = 2$ Вт/(м·К), 4 – $\lambda_1 = 8$ Вт/(м·К)

Для выражений (19) и (20) по термограммам, полученным в ходе моделирования при различных теплопроводностях топлива и тепловой проводимости зазора топливо – оболочка, строились зависимости безразмерной температуропроводности χ от Bi . Случай $\lambda_1 = 5$ Вт/(м·К), $\alpha = 1,4 \cdot 10^3$ Вт/(м²·К) и $q_v = 6 \cdot 10^6$ Вт/м³ приведен на рис. 9. Линия 1 соответствует выражению (19), 2 соответствует (20). Пересечение 1 и 2 определяет искомые величины χ и Bi .

Графическое определение параметров дает следующие значения: $\chi=1,152$, $Bi=1,091$.

В графическом представлении выражения (19) и (20) будут иметь вид, который приведен на рис. 9.

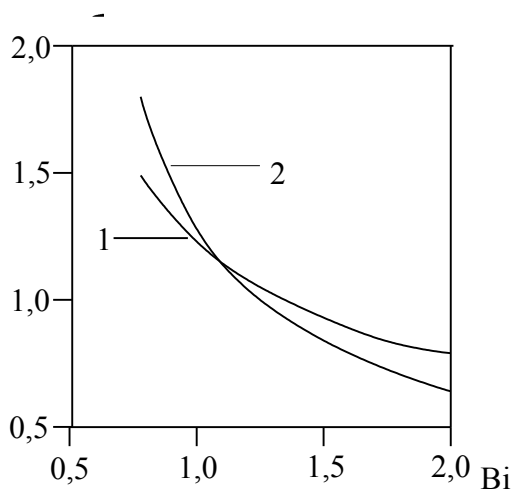


Рис. 9. Зависимости безразмерной теплопроводности χ от Bi для случая $\lambda_1 = 5 \text{ Вт/(м·К)}$, $\alpha = 1,4 \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, $q_v = 6 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^3$, где 1 – соотношение (19), 2 – соотношение (20)

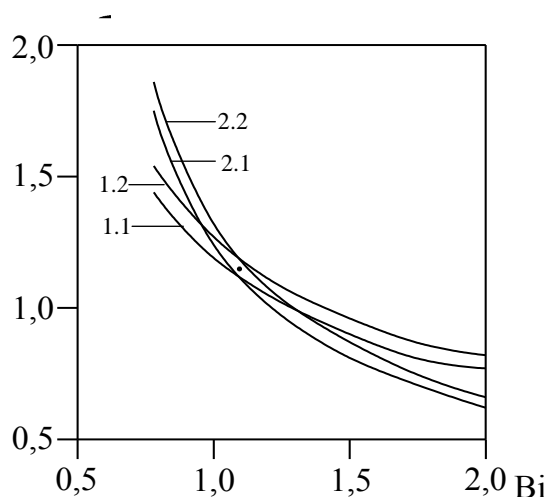


Рис. 10. Зависимости безразмерной теплопроводности χ от Bi с учетом погрешности измерения температуры $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. 1.1, 1.2 – соответствуют соотношению (19), 2.1, 2.2 – соотношению (20).

Величины $\chi_m = \lambda_1 \Delta\tau / 2c_1\rho_1 R_m^2$ и $Bi = \alpha R_m / \lambda_1$, рассчитанные по параметрам твэла для этого случая, составляют: $\chi_m = 1,183$, $Bi_m = 1,064$. Погрешность определения χ и Bi , которые были определены по предлагаемой методике в результате обработки термограмм, полученных численным моделированием, составляет: $\delta\chi/\chi_m = -0,026$, $\delta Bi/Bi_m = 0,025$.

Относительная погрешность определения $\chi \approx 3\%$, $Bi \approx 3\%$. Приведенные значения χ и Bi были рассчитаны при точном определении температур в эксперименте, реальные значения θ могут иметь погрешность $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Вид зависимости χ от Bi при измерении температуры с указанной погрешностью приведен на рис. 10.

Точкой на рис. 10 обозначены величины χ и Bi , соответствующие $\chi = 1,152$, $Bi = 1,091$. Погрешность измерения температур оболочки и поверхности центрального отверстия приводит к тому, что решения системы уравнений (19 – 20) образуют область, имеющую вид четырехугольной фигуры с центром в точке $\chi = 1,152$; $Bi = 1,091$. При измерении температуры с точностью $\pm 0,1 \text{ К}$ в данном случае относительная погрешность определения $\chi \approx \pm 10\%$, $Bi \approx \pm 15\%$. Если произведение $c_1\rho_1$ определено с относительной погрешностью $\pm 5\%$, то λ_1 определяется с погрешностью $\pm 15\%$, а термическая проводимость контакта α будет иметь погрешность $\pm 25 - 30\%$.

Результаты измерений теплопроводности диоксидов урана с ультрадисперсными фракциями в диапазоне температур 80–340 К

При разработке новых технологий изготовления ядерного топлива эффективным методом исследования ТФС являются измерения в области пониженных температур. Систематические измерения теплопроводности в зависимости от плотности, кислородного отношения и макроструктуры, содержания добавок ультрадисперсных фракций дают информацию о степени совершенства технологического процесса изготовления ядерного топлива.

Образцы UO_2 были изготовлены во ВНИИХТ. Характеристики образцов представлены в табл. 1 и 2. Исходная смесь фракций UO_2 прессовалась при нагрузке 2 т. Спекание проводилось при температуре 1750 °С в течение двух часов. Ультрадисперсный порошок UO_2 (УДП) состоял из частиц со средним диаметром 500 нм. Сами же эти частицы, представляли собой конгломерат из частиц со средним диаметром 50 нм.

Таблица 1

Основные характеристики образцов партии №1

№ образца	ρ , г/см ³	Пористость, p	λ (293 К), Вт/(м·К)	x , U^{235} , %	УДП, мас. %
1	10,58	0,034	7,54	2,8	0
2	10,24	0,065	6,72	2,8	5-10
3	10,18	0,071	6,11	2,8	5-10
23	10,5	0,041	7,54	2,8	0
8.1	10,51	0,041	7,13	3,4	10
13	10,73	0,020	7,35	3,6	5
9	10,51	0,041	7,67	3,6	10
11	10,65	0,028	7,7	3,6	10
15.1	10,67	0,026	7,65	3,6	10

Таблица 2

Основные характеристики образцов партии № 2

№ образца	ρ , г/см ³	Пористость, p	λ (293 К), Вт/(м·К)	УДП, мас. %
19	10,58	0,034	7,42	0
21	10,78	0,017	7,51	0
7	10,45	0,047	5,54	5
8.2	10,43	0,049	5,01	10
9.2	10,44	0,048	5,87	5
15.2	10,47	0,045	6,93	5
16	10,41	0,050	6,10	10
17	10,48	0,044	6,23	5
18	10,48	0,044	5,84	10

Исследованы две партии образцов. Образцы партии № 1 имели форму полого цилиндра, внешним диаметром $D = 7,7$ мм, внутренним $d = 2,4$ мм, длиной $L = 12$ мм. Образцы партии № 2 были изготовлены без центрального отверстия и фасок.

Результаты измерений

Результаты измерений коэффициента теплопроводности (КТ) образцов с УДП представлены на рис. 11, а зависимость КТ от пористости при $T = 293$ К на рис. 12.

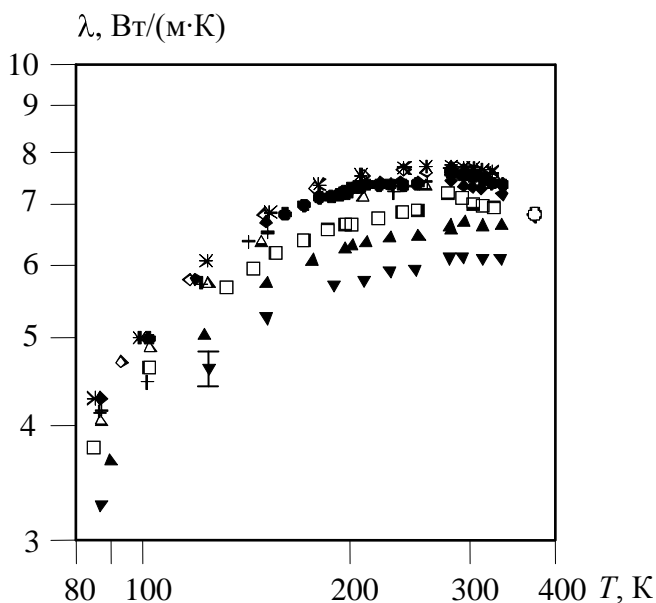


Рис. 11. Теплопроводность образцов диоксида урана с УДП: □ - № 8; ◆ - № 13; △ - № 9; * - № 11; ◇ - № 15.1; ▲ - № 2; ▼ - № 3; + - № 23; ○ - UO_2 (С. Ronchi *et al* 1999, $p = 0,05$)

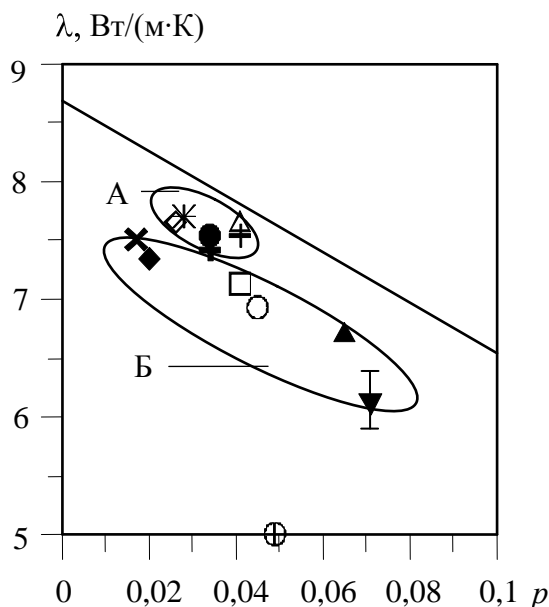


Рис. 12. Зависимость теплопроводности образцов от пористости p при $T = 293$ К:
партия № 1: ● - № 1; □ - № 8; ◆ - № 13; △ - № 9; * - № 11; ◇ - № 15.1; ▲ - № 2; ▼ - № 3; + - № 23; — - корреляция Брандта и Нойера;
партия № 2: + - № 19; × - 21; ⊕ - № 8; ○ - № 15.2

Исследованные образцы можно разделить на две группы. В первую (А на рис. 12) входят образцы: №№ 9, 11 и 15. Коэффициенты теплопроводности этих образцов удовлетворительно описываются зависимостью Брандта и Нойера. С ростом плотности (уменьшением пористости) КТ увеличиваются и коррелируют с КТ стандартного диоксида № 23 ($\rho = 10,5$ г/см³).

Во вторую группу (Б на рис. 12) входят образцы: № 8 ($\rho = 10,51$ г/см³), № 13 ($\rho = 10,73$ г/см³), № 2 ($\rho = 10,24$ г/см³) и № 3 ($\rho = 10,18$ г/см³). Коэффициенты теплопроводности этих диоксидов (рис. 12) отклоняются от зависимости Брандта и Нойера. Особенно отклонение выражено для образцов № 13 и № 3.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработан, теоретически и экспериментально обоснован метод определения температуропроводности материалов ядерной техники путем нагрева образцов лазерным импульсом. Особенностью метода является учет утечек тепла с поверхности образца и учет конечной длительности лазерного импульса. Проведено экспериментальное обоснование метода для материалов с высокой, средней и низкой теплопроводностью. Показано, что при импульсном нагреве образца температуропроводность материалов может быть определена с помощью процедуры регрессии на начальном участке термограммы с погрешностью не более $\pm 5\%$.

2. Показано, что на установке «Квант – Б» можно проводить измерения температуропроводности материалов ядерной техники и оксидного ядерного топлива в интервале температур 400–1650 °С с погрешностью не более $\pm 5\%$.

3. Разработан метод определения теплоемкости твэлов энергетических реакторов путем нагрева оболочки твэла периодическими импульсами тепловыделения. Метод верифицирован на основе проведенных численных расчетов с применением метода конечных элементов, а также подтвержден экспериментально на модельном твэле ВВЭР при температуре, близкой к комнатной.

4. Разработан метод определения ТФС твэлов реакторов типа БН без разрушения твэла, который может быть адаптирован к условиям измерений в горячей камере.

5. Предложен метод определения ТФС твэлов ВВЭР с помощью нагрева оболочки твэла в адиабатических условиях. Метод проверен моделированием процесса нагрева методом конечных элементов. Методы определения ТФС твэлов путем нагрева оболочки предлагается использовать в диапазоне температур 20–900 °С. При температурах выше 1000 °С необходимо применять метод импульсного лазерного нагрева.

6. В результате проведенных измерений коэффициента теплопроводности топливных втулок из диоксида урана, изготовленных по традиционной технологии и по технологии с использованием УДП, показано, что использование УДП при изготовлении ядерного топлива позволяет производить образцы с теплопроводностью, которая соответствует теплопроводности диоксида урана, изготовленного по традиционной технологии. В ряде случаев наблюдается уменьшение теплопроводности, которое невелико и, вероятно, связано с нестехиометрией состава ультрадисперсной фазы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Круглов В.Б., Одинцов А.А. Решение нестационарной задачи теплопроводности для двухслойной системы с контактным термическим сопротивлением между слоями. // Вопросы теплопередачи в технологических процессах. Научные труды. Вып. 146. М. 1982. С. 87–92.

2. Деев В.И., Круглов А.Б., Круглов В.Б., Харитонов В.С. Установка для определения теплофизических свойств материалов в диапазоне температур 77 - 300 К. // Научная сессия МИФИ – 2002. Сборник научных трудов. Москва. 2002. Т. 8. С. 70.
3. Адрианов А.Н., Баранов В.Г., Годин Ю.Г., Круглов В.Б., Тенишев А.В. Влияние нестехиометрии и легирования на теплопроводность диоксида урана. // Перспективные материалы. 2003. № 6. С. 43–49.
4. Киселев Н.П., Круглов А.Б., Круглов В.Б., Харитонов В.С. Измерение теплофизических параметров тепловыделяющих элементов ЯЭУ методом периодических импульсов. // Материалы XIII семинара по проблемам физики реакторов. Москва, 2–6 сентября 2004 г. С. 185–186.
5. Круглов В.Б., Таипова Р.Д. Теплофизические свойства новых топливных композиций. // Научная сессия МИФИ–2007. Т.8. С. 66–67.
6. Круглов В.Б., Баранов В.Г., Годин Ю.Г., Тенишев А.В., Киреев Г.А. Установка для измерения температуропроводности ядерных материалов в рабочем интервале температур. // Тезисы докладов XII Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ, 7–10 октября 2008 г. Москва. С. 101.
7. Поздеева И.Г., Круглов В.Б., Харитонов В.С. Определение теплоемкости отработавшего ядерного топлива методом периодических импульсов // Материалы XV семинара по проблемам физики реакторов. Москва, 2–6 сентября 2008 г. С. 111.
8. Круглов В.Б., Поздеева И.Г., Шмельков А.Н. Нестационарные методы исследования теплофизических свойств стержневых ТВЭЛов ядерных энергетических реакторов. // Научная сессия МИФИ–2008. Т.1. С. 47–48.
9. Круглов В.Б., Поздеева И.Г. Определение теплофизических свойств ТВЭЛов с виброуплотненным топливом для реакторов типа БН-600 нестационарным методом. // Научная сессия МИФИ–2009. Т.1. С. 71.
10. Круглов А.Б., Круглов В.Б., Харитонов В.С., Петрунин В.Ф., Федотов А.В., Шилов В.В. Результаты измерения теплопроводности диоксида урана с ультрадисперсными фракциями. // Материалы VIII Всероссийской конференции «Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем». Москва. 2009. С. 152–156.
11. Круглов А.Б., Круглов В.Б., Тенишев А.В. Измерение температуропроводности материалов ядерной техники методом импульсного нагрева. // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48. № 1. С. 144–147.
12. Круглов А.Б., Круглов В.Б., Харитонов В.С., Поздеева И.Г. Измерение теплофизических свойств ТВЭЛов энергетических ядерных реакторов методом импульсного нагрева. // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2010. № 1. С. 146–152.
13. Круглов В.Б., Круглов А.Б., Харитонов В.С., Петрунин В.Ф., Федотов А.В. Теплопроводность диоксида урана с ультрадисперсными фракциями. // Ядерная физика и инжиниринг. 2010. Т.1. № 1. С. 56–60.