

УДК 621.039.548

На правах рукописи



Дреганов Олег Игоревич

**ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ТВЭЛОВ ВВЭР-1000 С ПОВЫШЕННОЙ
УРАНОЕМКОСТЬЮ В АВАРИИ С ПОТЕРЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ УСЛОВИЙ В РЕАКТОРЕ МИР**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Димитровград – 2017

Работа выполнена в акционерном обществе «Государственный научный центр – научно-исследовательский институт атомных реакторов» (АО «ГНЦ НИИАР»).

Научный руководитель: **Шулимов Виталий Николаевич**
кандидат технических наук,
ведущий сотрудник лаборатории
реакторного исследовательского комплекса
АО «ГНЦ НИИАР»

Официальные оппоненты: **Ёлкин Илья Владимирович**
доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник
НИЦ «Курчатовский институт»

Лиханский Владимир Валентинович
доктор физико-математических наук,
профессор, директор отделения безопасности
объектов атомной энергетики АО "ГНЦ РФ
ТРИНИТИ"

Ведущая организация: Акционерное общество «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н. А. Доллежала» (АО «НИКИЭТ»)

Защита диссертации состоится « 27 » 02 2018 года в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 520.009.06 на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»: г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте www.nrcki.ru

Автореферат разослан « ___ » _____ 2018 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук, доцент



А.С.Колокол

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Федеральной программой «Развитие атомного энергопромышленного комплекса России» предполагается ввод новых атомных станций, отвечающих требованиям по безопасности и экономичности эксплуатации. Существенное место в этой программе занимают реакторы типа ВВЭР, что обуславливает постоянное совершенствование и модернизацию конструкций ТВС и твэлов.

Технология водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) в настоящий момент востребована и обладает высоким потенциалом. Высокую надежность и безопасность подтверждает многолетний положительный опыт эксплуатации действующих энергоблоков с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 в России, странах ближнего и дальнего зарубежья. Одним из путей повышения конкурентоспособности АЭС с ВВЭР является улучшение топливоиспользования, которое может быть достигнуто за счет увеличения максимального проектного выгорания топлива и внедрения тепловыделяющих элементов (твэлов) с повышенной ураноемкостью. Этому вопросу в настоящее время уделяется большое внимание.

Основными отличиями твэлов с увеличенной ураноемкостью новой конструкции, влияющими на его конечное состояние в условиях проектной аварии с большой течью теплоносителя (далее LOCA), являются: отсутствие центрального отверстия (ЦО) в топливной таблетке и утоненная оболочка (толщина оболочки уменьшена на 14,6 %).

При лицензировании топлива ВВЭР для эксплуатации на АЭС необходимы экспериментальные данные о поведении твэлов не только в условиях нормальной эксплуатации, но и в условиях аварий, что предусматривают федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. До настоящего времени проведено ограниченное количество реакторных экспериментов типа LOCA с твэлами старой конструкции (топливо с центральным отверстием и штатной оболочкой) ВВЭР высокого выгорания. Экспериментальные данные по поведению твэлов с увеличенной ураноемкостью отсутствовали.

На основании изложенного, изучение поведения твэлов с повышенной ураноемкостью (конечного состояния оболочки и топливного сердечника) в условиях LOCA является актуальной задачей.

Задача решается путем проведения экспериментов в канале исследовательского реактора с последующим исследованием в защитных камерах влияния на состояние твэлов экстремальных параметров. Получаемые данные используются для доказательства безопасности твэлов в условиях проектных аварий и применяются для верификации расчетных

кодов.

Проектная авария с большой течью теплоносителя (LOCA), на реакторной установке (РУ) ВВЭР-1000 связана с разрывом трубопровода максимального диаметра первого контура охлаждения. Согласно расчетным исследованиям переходный процесс имеет три стадии.

На первой скоротечной стадии происходит наибольшее изменение параметров в I контуре РУ. Длительность этой стадии составляет около 30 с. Максимальная температура оболочки твэлов может повышаться до 1000 °С, давление снижается до 0,5 МПа. На этой стадии прогнозируется выход из строя твэлов, которые на момент наступления аварии имели максимальную мощность. Основная часть твэлов остается герметичными, которые оказывают основное влияние на характер дальнейшего протекания аварии.

На второй стадии аварии в АЗ реактора происходит вскипание теплоносителя, и появление границы раздела фаз водного теплоносителя с образованием парового пространства в верхней части. За время нахождения твэлов в паровой среде (около 300 с – длительность второй стадии) температура оболочки может повышаться до (700-800) °С, при этом перепад давления на оболочке твэла составляет (5-6) МПа (максимум). Могут возникнуть условия, при которых большая деформация оболочек может привести к разгерметизации твэла и ее последствиям – фрагментации топливного сердечника, осевого перемещения топлива и выход его в теплоноситель.

Третья стадия – повторное смачивание при заполнении АЗ реактора водой от системы аварийного расхолаживания, создание термошока для оболочки твэла.

Вследствие этого, возникают задачи, решение которых представляется актуальным:

- определение условий, при которых происходит разгерметизация твэлов во второй стадии LOCA;
- изучение поведения и конечного состояние твэлов, которые остались герметичными после завершения аварийной ситуации;
- определение конечного состояния твэла после разгерметизации оболочки в расчетном диапазоне температуры.

Необходимость решения этих задач делает целесообразным постановку реакторных экспериментов, в которых на испытуемом объекте моделируются параметры, характерные только для второй и третьей стадий проектной аварии LOCA на ВВЭР-1000.

Целью диссертационной работы является разработка методологии проведения эксперимента, разработка и внедрение экспериментального устройства на РУ МИР для испытания твэлов ВВЭР-1000 в условиях второй и третьей стадий аварии LOCA, получение данных о поведении твэлов с повышенной ураноемкостью с высоким выгоранием топлива.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **научно-технические задачи**:

1. Разработана методология проведения эксперимента – температурный сценарий и алгоритм его реализации в реакторе.

2. Разработано и внедрено на РУ МИР экспериментальное устройство (ЭУ) для испытания твэла ВВЭР с повышенной ураноемкостью с выгоревшим топливом в условиях LOCA в расчетном режиме, выбрана номенклатура средств измерения параметров и состав стендового оборудования.

3. Подготовлены и проведены реакторные эксперименты.

4. Разработана трехмерная расчетная модель экспериментального устройства для определения пространственно-временного распределения температуры в твэле, необходимое для расчета термомеханического состояния твэла.

Научная новизна

1. Разработана методология реакторного эксперимента для испытания твэла ВВЭР в условиях II и III стадий LOCA.

2. Разработано экспериментальное устройство для проведения реакторных испытаний твэлов с топливом высокого выгорания в условиях LOCA, в котором:

- созданы условия для контролируемого разогрева одиночного твэла и адекватной деформации оболочки твэла, что обеспечено наличием дистанционирующих решеток в области максимальной температуры оболочки;

- разработан узел крепления ТЭП на оболочку твэла с топливом высокого выгорания и изучена его термометрическая характеристика, позволяющие в режиме реального времени определять температуру оболочки выгоревшего твэла в зоне максимальной деформации;

- разработана и внедрена инструментовка твэла с топливным сердечником без ЦО датчиком для определения в режиме реального времени давления газов в твэле.

3. При проведении реакторных экспериментов впервые были получены данные о поведении твэлов ВВЭР-1000 с высоким выгоранием и повышенной ураноемкостью в условиях LOCA с потерей теплоносителя.

4. При расчетном трехмерном моделировании получено пространственное распределения температуры оболочки твэла, что позволило получить исходные данные для расчета термомеханического состояния твэла.

Практическая значимость работы

1. Разработанное и внедренное на РУ МИР экспериментальное устройство (испытательное внутриканальное устройство, стенд для обеспечения работы устройства на всех стадиях реакторного эксперимента) и методология эксперимента LOCA значительно расширили возможности реакторных исследований поведения свежих и облученных ТВЭлов в условиях аварии с большой течью теплоносителя.

2. Получены экспериментальные данные, которые используются:

- при обосновании безопасности эксплуатации ТВЭлов ВВЭР-1000 с повышенной ураноемкостью на АЭС;

- для отработки и верификации расчетных кодов для определения термомеханического состояния ТВЭлов (в частности, кода РАПТА 5/2);

- для лицензирования ядерного топлива АЭС «Темелин» в Надзорном органе Чешской Республики.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Экспериментальное устройство и методология проведения экспериментов в канале реактора МИР, разработанные для изучения поведения ТВЭлов новой конструкции с топливом высокого выгорания в условиях II и III стадий LOCA.

2. Результаты испытаний укороченного ТВЭла ВВЭР-1000 с повышенной ураноемкостью с высоким выгоранием топлива в условиях II и III стадии LOCA, которые подтверждают правильность принятых технических решений при разработке экспериментального оборудования.

3. Результаты трехмерного расчета пространственного распределения температуры ТВЭла, которые наиболее полно отражают условия его испытания и которые используются в расчетных кодах.

Достоверность результатов

Проектные характеристики и высокая эксплуатационная надежность устройства для испытания ТВЭлов в условиях II и III стадии LOCA подтверждены успешным проведением реакторных экспериментов в канале реактора МИР.

Термометрическая характеристика узла крепления ТЭП для измерения температуры оболочки ТВЭла подтверждена результатами эксперимента на лабораторной установке с использованием в ЭУ имитатора ТВЭла с внутренним электронагревателем и результатами послереакторных исследований ТВЭла.

Нейтронно-физические расчеты условий испытаний проведены по аттестованным

кодам. Результаты теплогидравлических расчетов, выполненных с использованием трехмерного моделирования, хорошо коррелируют с результатами экспериментов.

Достоверность результатов измерений обеспечена применением датчиков внутризонного контроля параметров, прошедших аттестацию и индивидуальную градуировку на лабораторном стенде, и подтверждена данными послереакторных материаловедческих исследований.

Личный вклад автора

Лично автором:

- на момент начала работы выполнен анализ возможностей существующих экспериментальных баз для испытаний твэлов с высоким выгоранием топлива водоохлаждаемых энергетических реакторов в режиме LOCA, на основании которого сформулированы технические требования к ЭУ, которое разработано в рамках диссертационной работы;

- на лабораторной установке с использованием ЭУ и имитатора твэла изучена термометрическая характеристика узла крепления ТЭП для измерения температуры оболочки твэла с высоким выгоранием топлива;

- разработана трехмерная расчетная модель ЭУ и проведены расчеты пространственного распределения температуры твэла;

- подготовлены исходные данные для использования в кодах, рассчитывающих термомеханическое состояние твэла.

При непосредственном участии автора:

- разработан температурный сценарий и алгоритм проведения реакторного эксперимента для изучения поведения твэлов ВВЭР при параметрах LOCA;

- разработано и внедрено на РУ МИР ЭУ и оборудование, обеспечивающее его работу в расчетном режиме, определены необходимый объем и номенклатура датчиков для инструментировки твэла и устройства;

- разработана программа и проведены реакторные эксперименты, получены первичные результаты измерения параметров.

Непосредственное творческое участие в подготовке и реализации реакторных испытаний принимали сотрудники АО «ГНЦ НИИАР»: А.В. Алексеев, И.В. Киселева, В.А. Овчинников, А.В. Киселев, А.П. Малков, А.В. Горячев, Л.В. Киреева, а также группы по эксплуатации реактора под руководством главного инженера РУ МИР В.А. Свистунова.

В подготовке технического задания для экспериментов участвовали В.И. Кузнецов, А.В. Салатов, П.В. Федотов (АО «ВНИИНМ»), Ю.В. Пименов (АО «ТВЭЛ»).

Всем принимавшим участие в подготовке и проведении экспериментов автор выражает

признательность и благодарность.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены и обсуждены на:

– научно-технической конференции АО «ТВЭЛ» «Ядерное топливо нового поколения для АЭС. Результаты разработки, опыт эксплуатации и направления развития» (НТК-2016), 16-17 ноября 2016 г., г. Москва, АО «ВНИИНМ»;

– научно-технической конференции молодых специалистов «Иновации в атомной энергетике», 20-21 ноября 2014г. г. Москва, ОАО «НИКИЭТ»;

– 9-ой международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 19-22 мая 2015 г., Россия, г. Подольск, ОКБ «ГИДРОПРЕС»;

– всероссийской молодежной конференции «Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения», 5-7 апреля 2016г., г. Дмитровграде, АО «ГНЦ НИИАР»;

– международной научно-технической конференции «Top Fuel – 2015», 13-17 сентября 2015г., Швейцария, г. Цюрих;

– на рабочем совещании «Рабочая группа по топливной безопасности при аварии ЛОСА», 20-21 мая 2015г. Франция, г. Акс-ен-Прованс;

– 10-ой международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 16-19 мая 2017 г., Россия, г. Подольск, ОКБ «ГИДРОПРЕС».

Публикации

По результатам исследований при участии автора в научных изданиях опубликовано 7 работ, в том числе, 6 – в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, три из которых входят в журналы из перечня ВАК и международные базы цитируемости Web of Science и Scopus.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка используемой литературы.

Работа изложена на 105 страницах текста, включая 68 рисунков, 11 таблиц. Список литературы содержит 42 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, определены цель и основные задачи разработок, изложены научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе (литературный обзор) представлены возможности существующих экспериментальных баз для изучения поведения твэлов в условиях аварии LOCA [1] в каналах исследовательских реакторов, которые применялись на момент начала работы по теме диссертации.

Для рассмотрения были выбраны устройства, в которых испытывались твэлы ВВЭР с топливом среднего и высокого выгорания:

- для испытания твэлов ВВЭР-1000 в составе 19-ти стержневой ТВС в канале реактора МИР (эксперименты БТ-2 и БТ-3) [2, 3];
- для испытания одиночных твэлов ВВЭР-1000 с высоким выгоранием топлива на реакторе Halden (эксперименты IFA-650.11 и IFA-650.6) [4, 5].

Анализ принципиальной возможности применения существующих экспериментальных устройств для испытаний твэлов в рамках диссертационной работы показал следующее:

- в устройствах для экспериментов БТ-2 и БТ-3 путем применения технических решений (физическое профилирование различных твэлов содержанием урана-235 в топливе) невозможно полностью устранить неравномерность энерговыделения по радиусу ТВС;
- длина оболочки твэла, которая попадает в область перегрева, не превышает 450 мм;
- в пучке твэлов довольно сложный характер теплообмена, что затрудняет определение параметров эксперимента с необходимой степенью точности.

Из этого следует, что если отсутствует необходимость изучения характера деформирования оболочки твэлов в составе пучка стержней, применение многоэлементных ТВС в качестве изучаемого объекта не оптимально.

В устройствах для экспериментов IFA-650.11 и IFA-650.6 длина обогреваемой части твэла, которая попадает в область параметров LOCA, составляет менее 500 мм. В области максимальной деформации оболочки отсутствует дистанционирующая решетка. Поэтому характер деформирования оболочки отличается от того, который имеется в рабочей кассете реактора ВВЭР. К тому же, существующая технология крепления ТЭП на оболочку выгоревшего твэла при использовании сварки (приварка крепежного хомута точечной сваркой) может быть причиной повреждения оболочки при проведении испытаний.

Исходя из рассмотренного литературного обзора, сформулированы технические требования, которые должны быть выполнены при разработке экспериментального оборудования для РУ МИР в рамках темы диссертационной работы:

- увеличение длины оболочки твэла, на которой реализуются параметры LOCA, и создание приближенных к реальным условиям деформации оболочки при наличии центральной дистанционирующей решетки;
- измерение температуры оболочки выгоревшего твэла в зоне максимальной деформации без воздействия на оболочку при установке датчика температуры (ТЭП);
- отсутствие азимутальной неравномерности температуры оболочки;
- внешний обогрев твэла на начальной стадии эксперимента (моделирование температурных условий твэла в штатной кассете реактора ВВЭР при возникновении аварии).

Во второй главе рассмотрены: методология проведения реакторного эксперимента, которая включает температурный сценарий (рисунок 1), алгоритм его реализации в канале исследовательского реактора МИР; особенности конструкции ЭУ и стендового оборудования для обеспечения работы внутриканального устройства в заданном режиме в течение всего эксперимента. В главе изложена номенклатура средств измерений параметров.

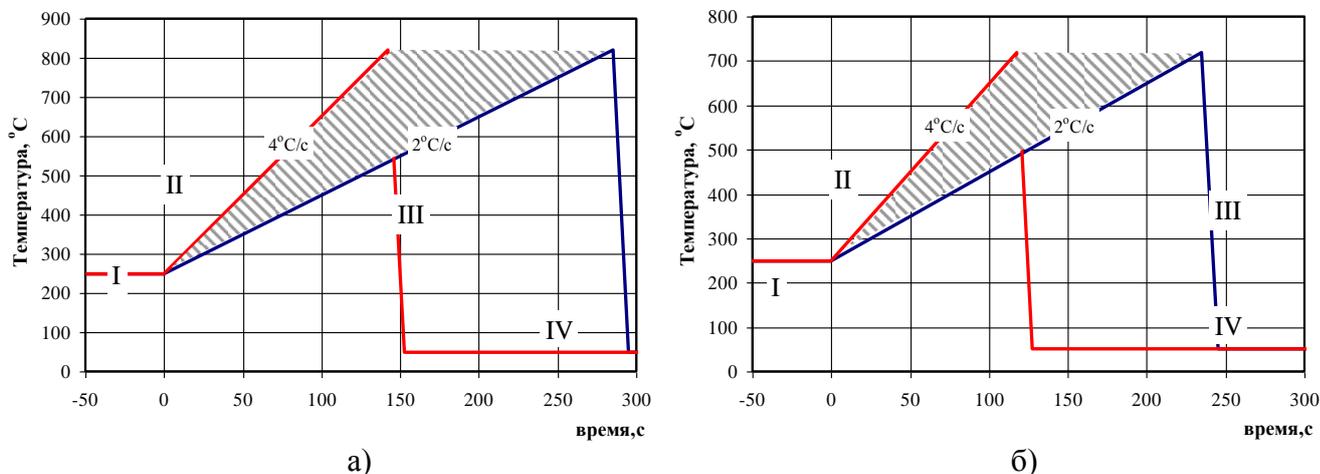


Рисунок 1 – Температурные сценарии экспериментов с максимальной температурой оболочки 700 °С (а) и 800 °С (б)

В соответствии с температурными сценариями (рисунок 1), разработанными для двух экспериментов, диапазон изменения скорости нагрева оболочки (2-4) °С/с.

Алгоритм проведения эксперимента обеспечивается режимом работы реактора МИР на каждом из четырех этапов температурного сценария. Режим работы реактора определен по результатам расчета кинетики активной зоны реактора МИР. Показано, что разогрев твэла на II

этапе температурного сценария реализуется при включенном автоматическом регуляторе мощности реактора, чем обеспечена ядерная безопасность эксперимента.

С учетом технических требований, сформулированных выше, разработано ЭУ для испытания одиночного твэла [6], который устанавливался по центру испытательного канала.

Конструкция ЭУ обеспечивает установку всех предусмотренных проектом датчиков контроля параметров эксперимента, герметизацию линий связи, дистанционную установку твэла в активную часть ЭУ в защитной камере. Датчики подключаются к системе измерения и регистрации параметров, которая работает в режиме реального времени.

В качестве объекта испытания (для изучения поведения в условиях LOCA или для изучения эксплуатационных характеристик экспериментального оборудования) используется твэл, изготовленный методом рефабрикации из фрагмента штатного твэла новой конструкции ВВЭР-1000 с повышенной ураноемкостью.

Конструкция ЭУ (рисунок 2) включает следующие основные узлы:

- центральную часть, в которой установлены: твэл и три дистанционирующие решетки из нержавеющей стали (12X18Н10Т) с шагом установки 200 мм – верхнюю, центральную, нижнюю (ВДР, ЦДР, НДР, соответственно), три трубки для закрепления ДР на заданной высотной координате;
- теплоизолятор, выполненный в виде обечайки (стали 12X18Н10Т) для уменьшения потока тепла на корпус ЭУ;
- две секции электронагревателя, последовательно расположенные по высоте центральной части;
- датчики контроля параметров, определяющие условия испытания твэла;
- узел герметичного вывода кабелей связи датчик – вторичный прибор и кабелей электропитания нагревателя;
- две импульсные трубки для подачи воды и отвода газа из верхней части ЭУ в бассейн реактора;
- головку для установки ЭУ в корпус канала.

Твэл инструментован датчиком давления (ДД) газа под оболочкой твэла, который также используется как индикатор для фиксации момента разгерметизации твэла. В номенклатуру измерительных датчиков входят ТЭП для измерения температуры оболочки в трех точках по высоте, измерения температуры теплоносителя на входе и на выходе активной части ЭУ, измерения температуры электронагревателя на уровне центра активной зоны реактора. В экспериментах использовались кабельные ТЭП второго класса допуска, с типом термопары хромель-алюмель (ТХА), диаметром стальной (12X18Н10Т) оболочки 1,5 мм, изоляцией из оксида магния, с совместным рабочим спаем термоэлектродов диаметром 0,27 мм. Все ТЭП

перед экспериментами были аттестованы по ГОСТ Р 8.585–2001, для которых величина поправки находится в диапазоне от -0,7 до -1,5 °С. При аттестации ТЭП, в данной поправке учтена термоэлектрическая неоднородность, а также связь датчика температуры со вторичным прибором – преобразователем сигнала. Постоянная времени для ТЭП не более 0,500 с.

Для измерения относительного изменения мощности твэла в ЭУ установлен детектор прямого заряда (ДПЗ) с гафниевым эмиттером. Изменение относительного уровня мощности твэла привязывалось также к показаниям ионизационной камеры (ИК), которая является принадлежностью измерительной системы РУ МИР.

Частота регистрации показаний датчиков в экспериментах информационно-измерительной системой – 1 Гц.

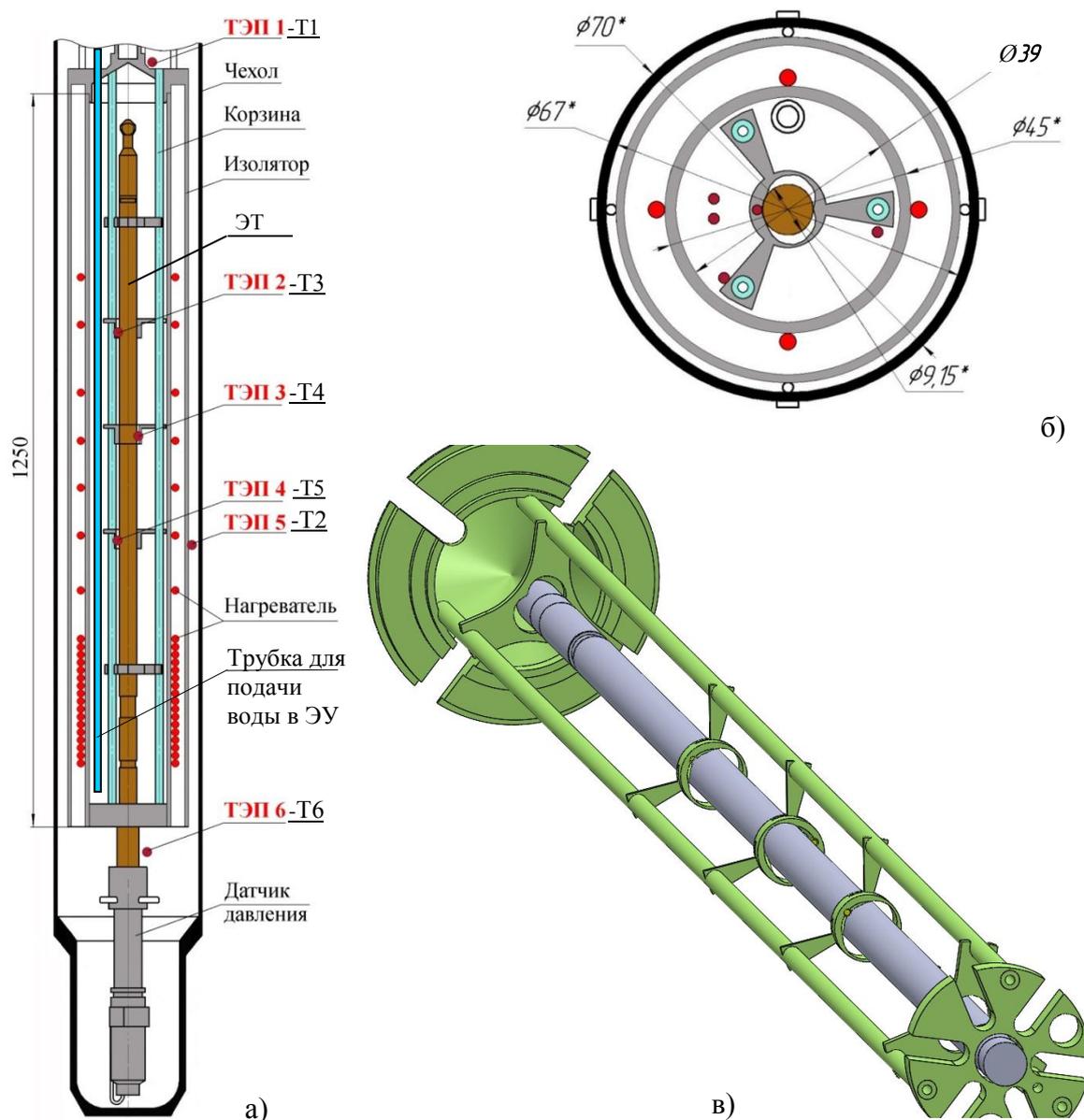


Рисунок 2 – Экспериментальное устройство: а) схема, б) поперечное сечение, в) крепление твэла в активной части

ТЭП для измерения температуры оболочки твэла закреплялись в дистанционирующие решетки специальной конструкции (как показано на рисунке 2-б и 2-в) на стадии сборки ЭУ на стапеле изготовителя таким образом, что при дистанционной установке твэла рабочий спай ТЭП прижимался к оболочке. Возможны две схемы расположения рабочего спая ТЭП – внутри ДР (в ЦДР) и на расстоянии (5-10) мм выше торца ДР (в НДР и в ВДР). Влияние ДР на показания ТЭП в условиях разогрева оболочки твэла было определено на лабораторном стенде с использованием ЭУ и имитатора твэла с внутренним электрообогревом диаметром 9,15 мм, длиной 1 м [7-9]. Степень влияния ДР и значения соответствующих поправок к показаниям ТЭП для определения температуры оболочки между решетками изучали в зависимости от скорости роста температуры (разогрева) имитатора твэла.

На рисунке 3 показаны зависимости величины поправки к показаниям ТЭП, установленных в ДР, от скорости разогрева оболочки, которые были получены на лабораторной установке. Графики построены для двух схем расположения рабочего спая ТЭП (в решетке и выше) при значении температуры рабочего спая ТЭП 300 °С и 600 °С.

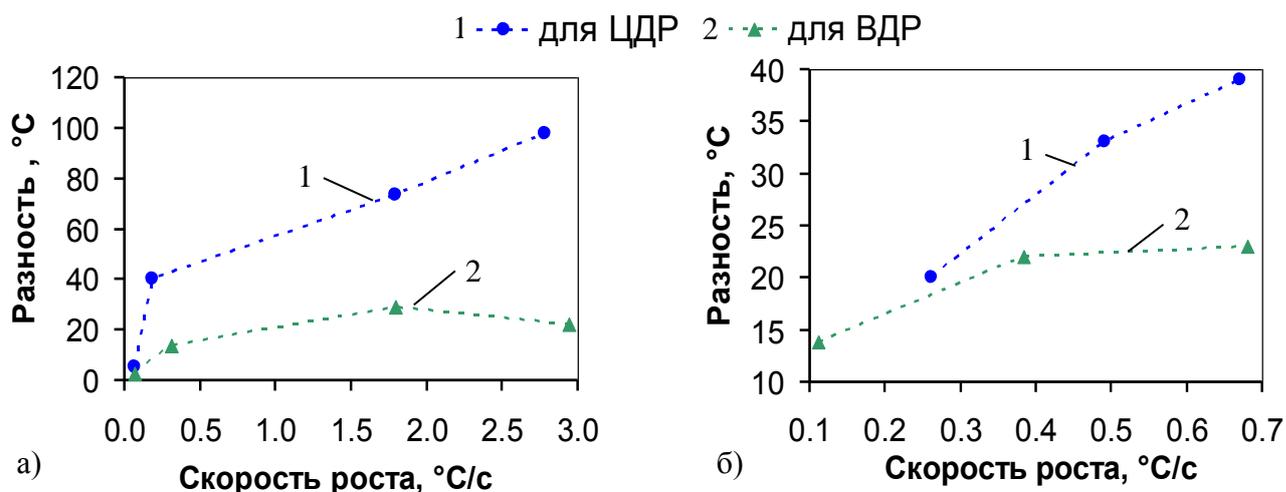


Рисунок 3 – Значения поправок к показаниям ТЭП в ДР при температуре рабочего спая ТЭП 300 °С (а) и 600 °С (б)

Диапазон изменения скоростей роста температуры оболочки, реализованный в экспериментах на лабораторной модели, соответствует расчетным значениям скоростей, которые задаются в реакторных экспериментах.

На стадии подготовки экспериментов выполнен комплекс нейтронно-физических и теплофизических расчетов условий испытания твэла, по результатам которых определена динамика повышения мощности твэла и ее конечная величина для достижения заданных параметров, а также рассмотрены вопросы ядерной безопасности.

Для проведения экспериментов разработана специальная картограмма загрузки активной зоны реактора МИР, в которой включение (срабатывание) автоматического регулятора мощности возможно при минимальной мощности реактора и достигается заданная скорость разогрева оболочки твэла.

В третьей главе представлены результаты двух реакторных экспериментов, в которых определены характеристики и эксплуатационные возможности ЭУ, и изучено поведение твэлов с повышенной ураноемкостью в условиях LOCA на РУ ВВЭР-1000. В главе приведены также некоторые результаты послереакторного исследования твэлов [10-13].

В эксперименте № 1 испытывался твэл с выгоранием топлива 45 МВт·сут/кгU, в эксперименте № 2 – 69 МВт·сут/кгU.

Результаты измерения параметров, которые в основном определяют термомеханическое состояние твэла, приведены на рисунке 4 и в таблице 1.

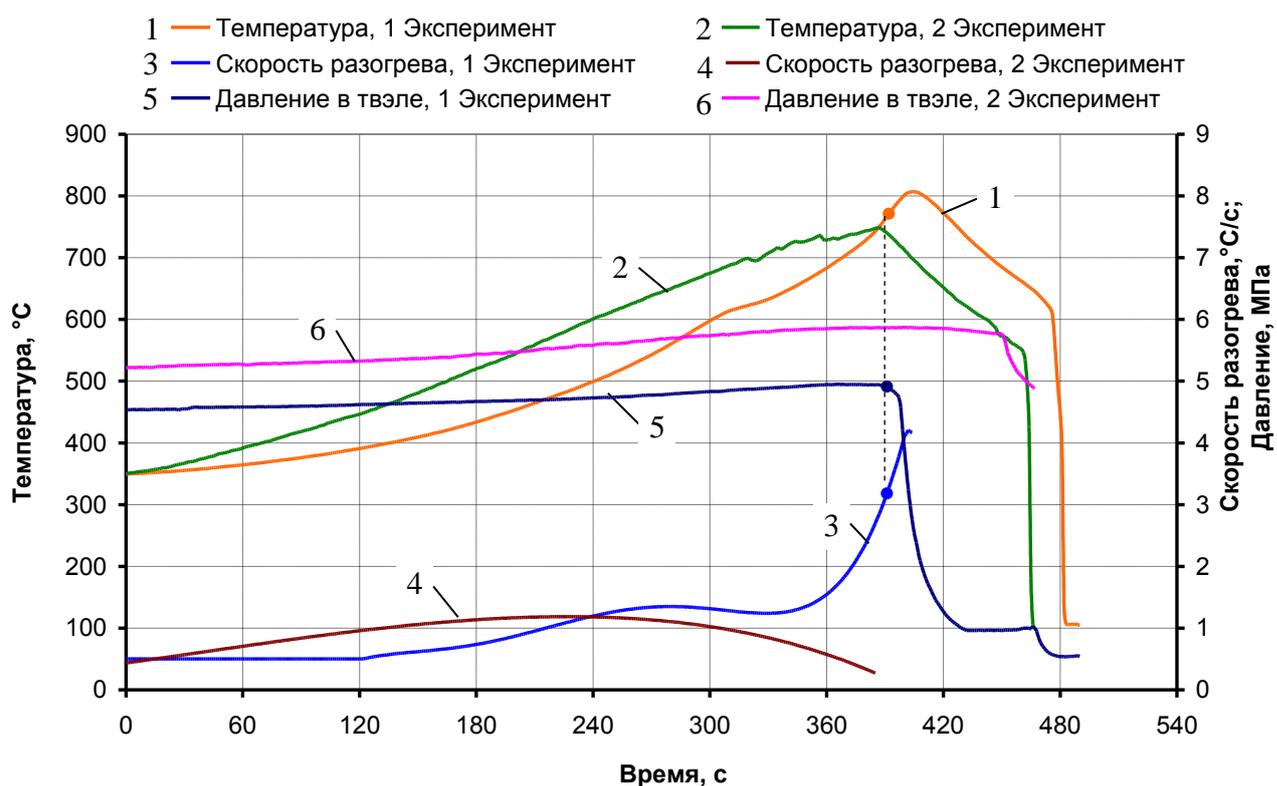


Рисунок 4 – Изменение температуры и скорости разогрева оболочки по показаниям ТЭП в ЦДР и давления газа под оболочкой твэла в экспериментах № 1 и № 2

Таблица 1 – Экспериментальные значения основных параметров

Параметр	Эксперимент № 1	Эксперимент № 2
Выгорание, МВт·сут/кгU	45,3	69,3
Увеличение диаметра оболочки, деформация	есть	есть
Разгерметизация:	есть	нет
– макс. температура оболочки, °С	770	
– перепад давления на оболочке, МПа	4,8	-
– макс. скорость разогрева оболочки, °С/с	3,2	
Максимальные значения параметров испытания:		
– температура оболочки по ТЭП в ЦДР, °С	807	748
– скорость разогрева по ТЭП в ЦДР, °С/с	4,2	1,2
– перепад давления на оболочке, МПа	4,9	5,8

По показаниям ДД разгерметизация оболочки твэла произошла только в эксперименте № 1. По характеру кривой падения давления видно, что образованию дефекта предшествовала значительная окружная деформация с образованием вздутия в месте разрыва. Этот факт был подтвержден результатами посттестовых исследований твэла после испытания в канале реактора, некоторые результаты посттестовых исследований приведены на рисунке 5. На участке оболочки с максимальной температурой окружная деформация максимальная.

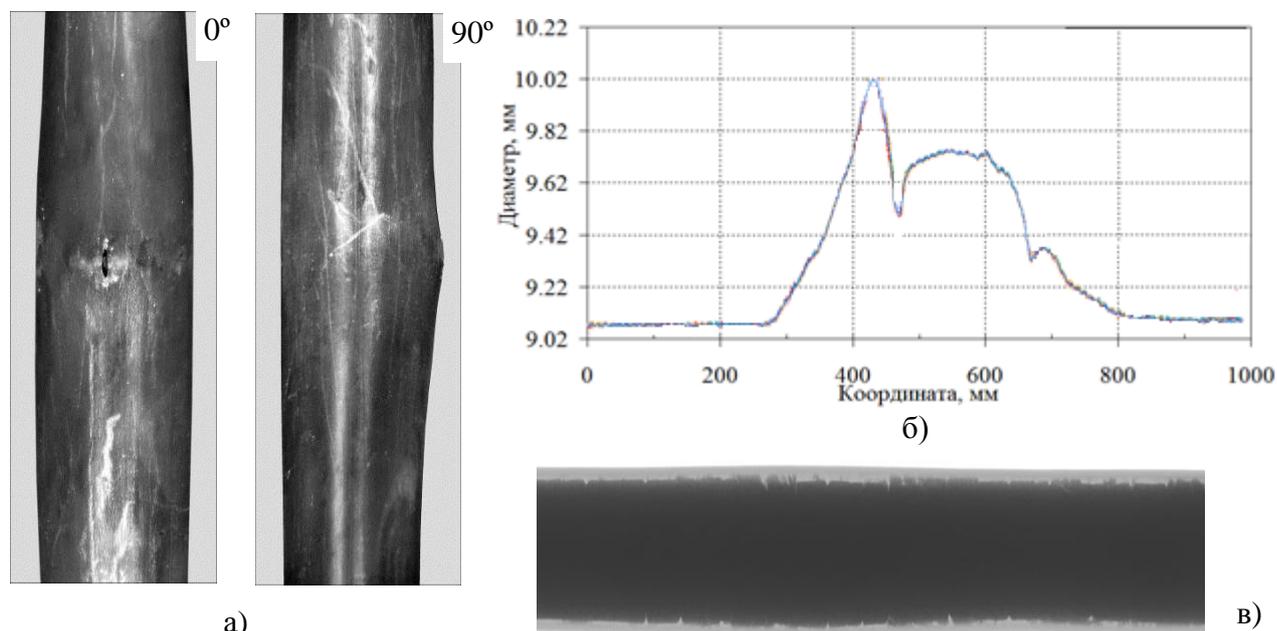


Рисунок 5 – Результаты послереакторных исследований: а) фотография фрагмента твэла (эксперимент № 1) с разрывом оболочки; б) график окружной деформации твэла (эксперимент № 2); в) рентгенорадиографический снимок участка твэла с максимальной деформацией оболочки (эксперимент № 2)

По результатам реакторных экспериментов и послереакторных исследований сделан вывод о применимости разработанного экспериментального оборудования для проведения испытаний твэлов с целью изучения их поведения в условиях второй и третьей стадий LOCA. Диапазон рабочих температур оболочки твэла в реакторном эксперименте составил (500-1000) °С. Возможный диапазон скоростей разогрева оболочки твэла – (1-5) °С/с.

В четвертой главе представлены результаты расчетного моделирования параметров экспериментов, целью которого являлось наиболее полное определение условий испытания твэла в ЭУ. Решалась задача нахождения пространственно-временного распределения температуры оболочки твэла на всех стадиях его разогрева в соответствии с температурным сценарием. Результаты расчетного моделирования необходимы для анализа результатов послереакторного исследования и применения в кодах для расчета термомеханического состояния твэла.

Расчеты выполнялись с использованием трехмерного моделирования (3D-модели) по методу конечных элементов (МКЭ) в теплогидравлическом и газодинамическом модуле Flow Simulation программного комплекса SolidWorks, физические свойства и характеристики используемых материалов в расчетной модели – справочные данные.

Для получения пространственного распределения температуры твэла разработана и апробирована расчетная модель ЭУ [14].

Составлен необходимый объем исходных данных для проведения расчетов и определены значения исходных параметров для решения трехмерной задачи.

На рисунках 6 и 7 приведены расчетные значения температуры оболочки твэла для экспериментов № 1 и № 2.

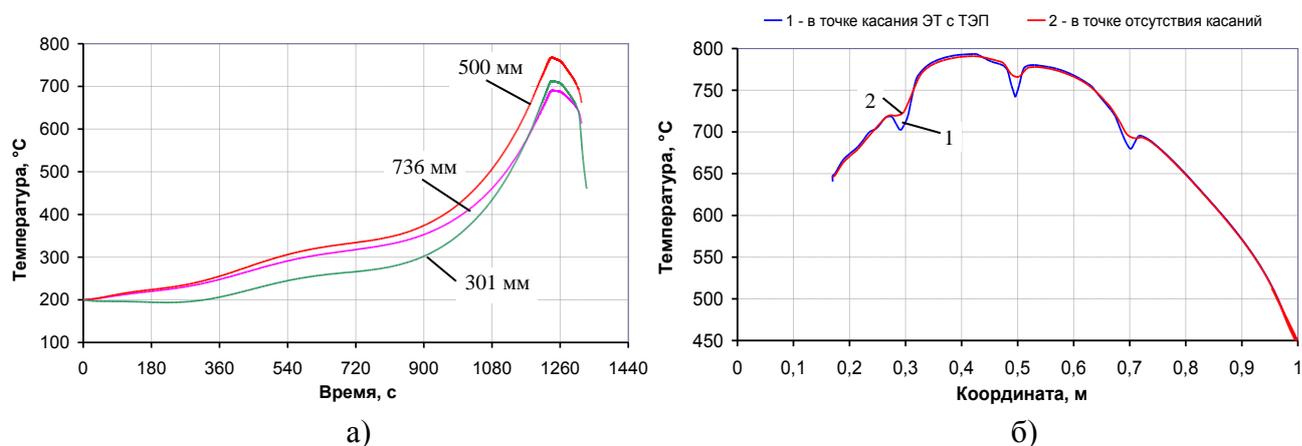


Рисунок 6 – Расчетные значения температуры оболочки твэла (эксперимент № 1): а) на различных высотных отметках (координата в мм от нижнего торца топливного сердечника); б) по высоте в двух точках (1, 2) по периметру

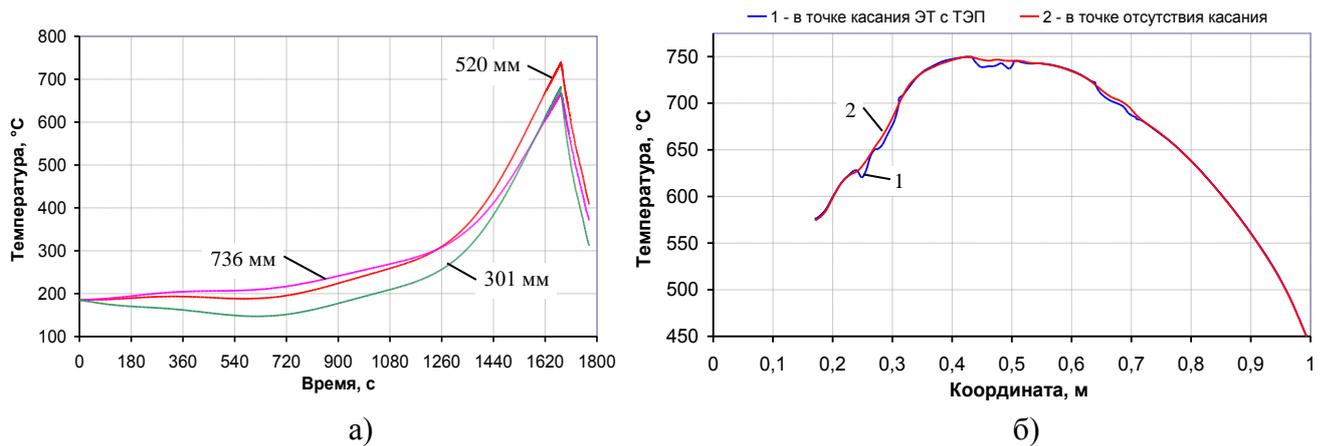


Рисунок 7 – Расчетные значения температуры оболочки твэла (эксперимент №2): а) на различных высотных отметках (координата в мм от нижнего торца топливного сердечника); б) по высоте в двух точках (1, 2) по периметру

Сравнение расчетных и экспериментальных данных позволяет сделать вывод об их удовлетворительном согласии, что доказывает правильность принятых решений при разработке расчетной модели и определении исходных данных.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана методология проведения эксперимента для испытания твэлов с выгоревшим топливом реактора ВВЭР-1000 при моделировании условий LOCA в исследовательском реакторе МИР, в том числе:

- разработан температурный сценарий реакторного эксперимента и алгоритм его проведения, что позволило в экспериментах получить требуемые параметры (температура оболочки 700 °C и 800 °C, скорость разогрева твэла в диапазоне (2-4) °C/c), которые отвечают переходному процессу II и III стадий LOCA на ВВЭР-1000;

- разработано и апробировано экспериментальное устройство, в котором с применением специальных технических решений обеспечены условия деформирования оболочки твэла с топливом высокого выгорания при его разогреве;

- разработан способ крепления ТЭП на оболочку облученного твэла, позволяющий в режиме реального времени определять температуру оболочки в зоне максимальной деформации.

2. При проведении реакторных экспериментов на реакторе МИР получены данные по поведению твэлов ВВЭР-1000 новой конструкции с повышенной ураноемкостью с топливом

высокого выгорания. Для этих твэлов получены следующие результаты:

– твэл с выгоранием топлива 45 МВт сут/kgU разгерметизировался при температуре оболочки 770 °С, со скоростью разогрева 3,2 °С/с, перепаде давления – 4,7 МПа;

– твэл с выгоранием топлива 69 МВт сут/kgU на конец испытаний остался герметичным, при этом температура оболочки составила 748 °С, перепад давления – 5,8 МПа.

Результаты выполненного комплекса послереакторных исследований твэлов подтвердили выводы по состоянию твэлов, сформулированные на основании данных прямого измерения.

3. По экспериментам № 1 и № 2 получены результаты пространственно-временного распределения температуры твэла при расчетном трехмерном моделировании, которые используются для расчета термомеханического состояния твэла в расчетных кодах.

В рамках выполнения диссертационной работы решена важная и актуальная задача – определены условия, при которых твэлы новой конструкции остаются герметичными, а также определено поведение твэлов при разгерметизации оболочки в условиях 2 и 3 стадий ЛОСА на ВВЭР-1000.

Результаты работы используются при лицензировании ядерного топлива для эксплуатации на АЭС и применяются в кодах (в частности, кода РАПТА 5/2) для расчета термомеханического состояния твэлов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

В изданиях из перечня ВАК и входящие в международные базы цитируемости

1. Дреганов О. И., Киселева И. В., Шулимов В. Н. и др. Результаты расчетного анализа термомеханического состояния твэла ВВЭР-1000 после испытания в канале исследовательского реактора в условиях аварии с потерей теплоносителя (ЛОСА) // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика ядерных реакторов, 2017. – № 2. – С. 60–66.

2. Алексеев А. В., Горячев А. В., Дреганов О. И. и др. Результаты испытания в реакторе МИР твэлов ВВЭР-1000 с высоким выгоранием топлива в условиях аварии с потерей теплоносителя // Атомная энергия, Т. 123, вып. 3. – 2017. – С. 133–137.

3. Алексеев А. В., Дреганов О. И., Киселева И. В., Шулимов В. Н. Измерение температуры оболочки твэла с выгоревшим топливом в диапазоне 500-900 °С в реакторном

эксперименте // Известия высших учебных заведений, серия «Ядерная энергетика», 2011 . №. , вып. С. (в печати)

В других научных изданиях

4. Алексеев А. В., Дреганов О. И., Киселева И. В. и др. Изучение поведения твэлов ВВЭР-1000 в условиях аварии с потерей теплоносителя (LOCA) // Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР». – Димитровград : АО «ГНЦ НИИАР», 2017, вып. 1. – С. 12–20. – ISBN 978-5-94831-154-8.

5. Дреганов О. И. Макин Р. С. Определение мощности твэла водо-водяного реактора с высоким выгоранием топлива в эксперименте типа LOCA // Димитровград : Вестник ДИТИ, 2014. – №2 (4). – С. 11–19.

6. Алексеев А. В., Дреганов О. И., Киселева И. В., Шулимов В. Н. Расчетные исследования возможности моделирования параметров I стадии максимальной проектной аварии на реакторе ВВЭР-1000 в петлевом канале исследовательского реактора // Сборник трудов ОАО «ГНЦ НИИАР», 2014, вып. 2, – С. 10–17.

7. Дреганов О. И., Короткова О. В. Нейтронно-физические расчеты модели экспериментального устройства с радиационным обогревом твэла // Вестник ДИТИ – 2017. – №1. – С. 40-45.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спассков, В. П. Реакторные исследования аварийного поведения активной зоны ВВЭР на петлевой установке ПВП-2 реактора МИР.М1 [Текст] / В. П. Спассков, А. М. Шумский, В. П. Семишкин [и др.] // Сб. докл. межд. конф. «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР. Теплофизика-98». – Обнинск : ГНЦ РФ ФЭИ, 1998. – Т. 2. С. 42–51.

2. Киселева, И. В. Исследование в реакторе МИР твэлов ВВЭР-1000 в условиях моделирующих II и III стадии аварии «большая течь». Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. [Текст] / И. В. Киселева. – Димитровград, 2010. – 132 с.

3. Алексеев А. В. Методика и результаты испытания в канале реактора МИР фрагмента ТВС ВВЭР-1000 в режиме МПА (II и III стадии) [Текст] / А. В. Алексеев [и др.] // Атомная энергия, Т. 103, вып. 5. – 2007. – С. 286–291.

4. Wiesenack, W. Halden Reactor Project LOCA experiments for 2nd code benchmark [Text] / W. Wiesenack // Ninth Plenary Meeting of the WGFS, Schloss Böttstein (Switzerland), 11–12 September 2008. Report IFE/HR/E-2008/014. — Norway, Halden: Institute for Energy Technology, 2008. — 26 p.

5. Lavoil, A. LOCA experiments IFA-650.11, EP-1650.11 [Text] / A. Lavoil // OECD Halden Reactor Project, October 2010.

6. Fedotov, P. V. LOCA test with high burnup VVER fuel in MIR reactor [Text] / P. V. Fedotov, O. I. Dreganov, A. L. Izhutov [et al] // TopFuel conference Proceedings, Zurich, Switzerland, 13–17 September 2015: Part II. — Brussels, Belgium: European Nuclear Society, 2015. P. 391–400. — Режим доступа: www.topfuel2015.org. Дата обращения: 16.01.2017.

7. Алексеев, А. В. Изучение поведения твэлов ВВЭР-1000 в условиях аварии с потерей теплоносителя (LOCA) [Текст] / А. В. Алексеев, О. И. Дреганов, В. Н. Шулимов [и др.] // Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР». – Димитровград : АО «ГНЦ НИИАР», 2017, вып. 1. – С. 12–20. – ISBN 978-5-94831-154-8.

8. Алексеев, А. В. Изучение поведения твэлов ВВЭР-1000 с глубоким выгоранием топлива в условиях аварии с потерей теплоносителя (LOCA) в эксперименте МИР-LOCA/72 [Текст] / А. В. Алексеев, О. И. Дреганов, В. Н. Шулимов [и др.] // Сборник тезисов докладов 10-ой международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – Подольск : АО ОКБ «Гидропресс», 2017. – С. 102–103. – ISBN 978-94883-146-6.

9. Алексеев А. В. Измерение температуры оболочки твэла с выгоревшим топливом в диапазоне 500-900 °С в реакторном эксперименте [Текст] / А. В. Алексеев, О. И. Дреганов, И. В. Киселева, В. Н. Шулимов [и др.] // Известия высших учебных заведений, серия «Ядерная энергетика», 201 . №. , вып. (в печати).

10. Алексеев, А. В. Результаты испытания в реакторе МИР твэлов ВВЭР-1000 с высоким выгоранием топлива в условиях аварии с потерей теплоносителя [Текст] / А. В. Алексеев, А. В. Горячев, О. И. Дреганов [и др.] // Атомная энергия, Т. 123, вып. 3. – 2017. – С. 133–137.

11. Алексеев, А. В. Изучение поведения твэлов ВВЭР-1000 в условиях аварии с потерей теплоносителя (LOCA). Реакторные эксперименты МИР-LOCA/45 и МИР-LOCA/69 [Текст] / А. В. Алексеев, О. И. Дреганов, В. Н. Шулимов [и др.] // Программа конференции и тезисы докладов научно-технической конференции АО «ТВЭЛ» «Ядерное топливо нового поколения для АЭС. Результаты разработки, опыт эксплуатации и направления развития (НТК-2016)», Москва, 16–17 ноября 2016 г. — М.: АО «ВНИИНМ имени ак. А.А. Бочвара», 2016. С. 38.

12. Дреганов, О. И. Нейтронно-физические расчеты модели экспериментального устройства с радиационным обогревом твэла [Текст] / О. И. Дреганов, О. В. Короткова // Вестник ДИТИ – 2017. – №1. – С. 40-45.

13. Гончаров, А. А. Экспериментальные и расчетные исследования поведения топлива ВВЭР высокого выгорания в проектных авариях [Текст] / А. А. Гончаров [и др.] // Программа конференции и тезисы докладов научно-технической конференции АО «ТВЭЛ» «Ядерное топливо нового поколения для АЭС. Результаты разработки, опыт эксплуатации и направления

развития (НТК-2016)», Москва, 16–17 ноября 2016 г. — М.: АО «ВНИИНМ имени ак. А. А. Бочвара», 2016. С. 36.

14. Дреганов, О. И. Результаты расчетного анализа термомеханического состояния твэла ВВЭР-1000 после испытания в канале исследовательского реактора в условиях аварии с потерей теплоносителя (ЛОСА) [Текст] / О. И. Дреганов, И. В. Киселева, В. Н. Шулимов [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика ядерных реакторов, 2017. – № 2. – С. 60–66.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

ЛОСА	–	loss of coolant accident (авария с потерей теплоносителя)
АЗ	–	активная зона
АЧ	–	активная часть
АЭС	–	атомная энергетическая станция
БТ	–	большая течь
ВВЭР	–	водо-водяной энергетический реактор
ДД	–	датчик давления
ДПЗ	–	детектор прямого заряда
ДР	–	дистанционирующая решетка
ИК	–	ионизационная камера
МПА	–	максимальная проектная авария
РТВС	–	рабочая тепловыделяющая сборка
РУ	–	реакторная установка
ТВС	–	тепловыделяющая сборка
ТЭП	–	термоэлектрический преобразователь (термопара)
ЦО	–	центральное отверстие
ЭН	–	электронагреватель
ЭУ	–	экспериментальное устройство