

*На правах рукописи*



**АРЕФИНКИНА Светлана Евгеньевна**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОСТИ АМПУЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ  
В РЕАКТОРЕ ИР-8 ОПЫТНЫХ ТВЭЛОВ  
ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЯЭУ**

Специальность 2.4.9. – Ядерные энергетические установки, топливный цикл,  
радиационная безопасность

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2024 г.

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)

**Научный руководитель:** *Ерак Дмитрий Юрьевич*  
доктор технических наук,  
начальник отдела ресурса и прочности элементов  
ядерных реакторов НИЦ «Курчатовский  
институт», г. Москва.

**Официальные  
оппоненты:** *Киселев Аркадий Евгеньевич*  
доктор технических наук,  
заведующий отделением анализа безопасности ядерных  
энергетических установок ИБРАЭ РАН, г. Москва;

*Долгов Антон Игоревич*  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник отделения «Реакторный  
исследовательский комплекс» АО «ГНЦ НИИАР»,  
г. Димитровград.

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

Защита диссертации состоится 12 ноября 2024 г., начало в 14.00, на заседании диссертационного совета 02.1.003.04 на базе НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте [www.nrcki.ru](http://www.nrcki.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 02.1.003.04,  
кандидат физико-математических наук



Д.А. Шкаровский

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

Проведение реакторных экспериментов по исследованиям опытных ТВЭЛОВ (ОТ) в условиях, максимально приближенных к натурным, является важным этапом как при разработке новых инновационных реакторов, так и при совершенствовании уже эксплуатируемых реакторных установок.

Существующие планы развития реакторов типа ВВЭР в России обуславливают проведение работ в данных направлениях. АЭС с реакторами с водяным теплоносителем в долгосрочной перспективе будут оставаться основой для промышленной ядерной энергетики. Проекты легководных реакторов постоянно совершенствуются. В числе направлений развития реакторов типа ВВЭР можно выделить разработку инновационных установок с регулированием энергетического спектра нейтронов (ВВЭР-С), с водяным теплоносителем сверхкритических параметров (ВВЭР-СКД), а также повышение безопасности действующих реакторов за счет создания ТВЭЛОВ толерантного типа. Данные работы подразумевают, в частности, исследование большого количества кандидатных материалов, как оболочек ТВЭЛОВ, так и топливных композиций. Для реализации возможности обеспечения темпов испытаний требуемого количества кандидатных материалов в условиях реакторного облучения необходимо наличие достаточного количества экспериментальных площадок для исследований.

Испытания опытных ТВЭЛОВ для реакторов типа ВВЭР в нашей стране в настоящее время могут проводиться на таких площадках, как реакторы МИР, СМ в АО «ГНЦ НИИАР», ИВВ-2М в АО «ИРМ» и ИР-8 в НИЦ «Курчатовский институт». В условиях большого количества экспериментальных задач развитие исследовательской облучательной базы на реакторе ИР-8 для испытаний опытных ТВЭЛОВ является в данных условиях востребованным и актуальным.

На реакторе ИР-8 накоплен некоторый опыт испытаний ТВЭЛОВ различного типа. Представляется, что развитие таких экспериментов на ИР-8, учитывая имеющийся опыт и методики исследований, может стать продолжением опыта много-петлевого реактора МР, эксплуатировавшегося ранее в Курчатовском институте и являвшегося одной из важнейших площадок для испытаний опытных ТВЭЛОВ, как совершенствующихся, так и разрабатывавшихся реакторов в нашей стране.

Способы обеспечения представительности результатов испытаний опытных ТВЭЛОВ на ИР-8 рассмотрены в данной работе.

### **Цель работы**

Целью данной работы является разработка и апробация способов обеспечения представительности результатов испытаний опытных ТВЭЛОВ для перспективных ЯЭУ в реакторе ИР-8 в условиях, приближенных к натурным.

Для достижения данной цели были решены следующие **задачи**:

- Обоснование возможности реакторных исследований опытных твэлов и имитаторов твэлов в ампульных устройствах (АУ) при конвекции теплоносителя с СКД-параметрами в контролируемых и регулируемых условиях;
- Апробация нестационарного метода регулярного теплового режима для определения величины энерговыделения в экспериментальных образцах, облучаемых в ИР-8;
- Апробация расчетно-экспериментального метода определения инерции системы «Термопара – Объект контроля»;
- Отработка способа моделирования процессов внутри твэлов, облучаемых в АУ в реакторе ИР-8.

### **Научная новизна работы**

- Впервые предложен и обоснован способ проведения испытаний в реакторе ИР-8 образцов оболочек твэлов в ампульном устройстве в среде с СКД-параметрами в контролируемых и регулируемых условиях с использованием внутриампульной конвекционной петли.
- Проведена апробация применения нестационарного метода регулярного теплового режима (с установкой термопары в «критической» точке цилиндра) для определения величины энерговыделения в образцах, облучаемых в ИР-8.
- Проведена апробация расчетно-экспериментального метода определения инерции системы «термопара – объект контроля» для проверки надежности инструментации твэлов.
- Отработан способ моделирования процессов внутри твэлов инновационных ВВЭР, облучаемых в АУ в реакторе ИР-8 (в том числе, и для твэлов, инструментированных термопарами).

### **Практическая значимость**

- Разработанная схема конструкции ампульного устройства с использованием внутриампульной конвекционной петли с СКД-теплоносителем повышает представительность результатов облучения образцов в реакторе ИР-8, а также позволяет расширить возможности реакторных испытаний кандидатных материалов твэлов проектируемого реактора ВВЭР-СКД.
- Отработка нестационарного метода регулярного теплового режима для расчетно-экспериментального метода определения инерции системы «термопара – объект контроля» позволяет повысить точность определения величины энерговыделения и температуры образцов, облучаемых в реакторе ИР-8.
- Отработка способа моделирования процессов внутри твэлов, облучаемых в АУ в реакторе ИР-8, позволяет получить дополнительные данные для расчета параметров инструментированных термопарами твэлов и обосновать выбор способа их инструментации.

Таким образом, адаптация экспериментальных методик и расчетных кодов к условиям ампульного реакторного эксперимента с опытными ТВЭлами позволяет расширить спектр экспериментальных возможностей реактора ИР-8 при исследовании ОТ для перспективных ЯЭУ.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Разработка схемы внутриампульной конвекционной петли, позволяющей проводить испытания образцов оболочек ТВЭлов в среде с СКД-параметрами в контролируемых и регулируемых условиях в реакторе ИР-8.
2. Способ определения величины энерговыделения в образцах, облучаемых в ИР-8, с использованием нестационарного метода регулярного теплового режима.
3. Метод расчетно-экспериментального определения инерции системы «термопара – объект контроля» для выбора оптимального способа инструментации ТВЭлов.
4. Отработка способа моделирования процессов внутри ТВЭлов, облучаемых в ампульном устройстве в реакторе ИР-8, и его взаимосвязи с другими расчетными обоснованиями.
5. Способ оценки распределения температур в испытываемом ТВЭле, оболочка которого инструментирована термопарами.

### **Личный вклад автора**

- Автор участвовал в разработке схемы конструкции ампульного устройства с использованием внутриампульной конвекционной петли с СКД-теплоносителем. Автором лично проводились оценки теплогидравлических параметров теплоносителя для данного варианта АУ.
- Автор лично участвовал в получении данных о температуре инструментированного термопарами образца, а также в экспериментальном и расчетном определении величины инерции системы «термопара-объект контроля».
- Автор принимал участие в расчетах величины энерговыделения с использованием нестационарного метода регулярного теплового режима.
- Автор принимал активное участие в адаптации ТВЭльного кода SOTAR для расчета параметров ТВЭлов толерантного типа и ТВЭлов для проектируемого реактора ВВЭР-СКД.
- Автором лично проводились расчеты изменения параметров опытных ТВЭлов при моделировании их облучения в АУ в реакторе ИР-8.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 118 наименований, содержит 155 страниц, 10 таблиц и 54 рисунка.

### **Степень достоверности результатов**

Достоверность выводов и результатов, полученных в настоящей работе, обеспечивается их соответствием современным теоретическим представлениям и

согласованностью с данными, опубликованными в литературе. Анализ результатов теплогидравлических расчетов, проведенных для предложенного в работе варианта внутриампульной конвекционной петли, показывает, что при варьировании исходных данных изменения параметров теплоносителя в циркуляционном контуре не противоречат известным физическим моделям. Оценки величины энерговыделения в образцах, сделанные с использованием метода регулярного теплового режима, хорошо согласуются с результатами, полученными при использовании других подходов к определению энерговыделения. Достоверность расчетов процессов внутри твэлов с использованием программы SOTAR подтверждается обоснованностью сделанных допущений и приемлемым уровнем согласования полученных результатов с результатами расчетов, выполненных по другим кодам.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 12 работ, из них: 4 - в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 8 - в сборниках материалов отечественных и международных конференций. 2 работы - направлены в редакции изданий, рекомендованных ВАК РФ.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах:

1. Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ – 2023), Москва.
2. Конференция «Новые материалы: Перспективные технологии получения материалов и методы их исследования», 2023 г., Москва.
3. Межотраслевая научно-техническая конференция «Реакторные материалы атомной энергетики», Екатеринбург, 2023 г.
4. 13th International conference on WWER fuel performance, modelling and experimental support, Nessebar, Bulgaria, 2019.
5. Отраслевой семинар «Физика радиационных повреждений материалов атомной техники», Обнинск, 2019 г.
6. Международная конференция молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам, Подольск, ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2019.
7. Международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», Москва, 2018.
8. Конференция «Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения», Димитровград, 2018 г.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, практическая значимость и новизна полученных в работе результатов.

**В первой главе** рассмотрены подходы к планированию и проведению реакторных испытаний опытных твэлов, а также вопросы, связанные с контролем параметров экспериментов. Представлен обзор проводившихся испытаний опытных твэлов на исследовательских реакторах. Приведены примеры конструирования ампульных устройств, экспериментам с использованием которых и посвящена настоящая работа. Также сделан обзор расчетных программ, которые применяются для моделирования параметров твэлов в процессе их эксплуатации. Приведен обзор способов инструментации твэлов для контроля температуры в процессе испытаний.

Представлены технические характеристики реактора ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт». Конструктивные особенности реактора обеспечивают максимальные плотности потоков нейтронов в активной зоне ИР-8 на уровне: тепловых  $\sim 1,6 \cdot 10^{14}$  н/(см<sup>2</sup>·с), быстрых ( $E \geq 0,5$  МэВ)  $\sim 1,1 \cdot 10^{14}$  н/(см<sup>2</sup>·с); в отражателе: тепловых  $\sim 2,0 \cdot 10^{14}$  н/(см<sup>2</sup>·с), быстрых ( $E \geq 0,5$  МэВ)  $\sim 4,8 \cdot 10^{13}$  н/(см<sup>2</sup>·с). Проведением в 2002 - 2009 годах ампульных экспериментов по облучению опытных твэлов с топливными композициями ThO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> и UZr была обоснована принципиальная возможность реализации в реакторе ИР-8 испытаний опытных твэлов в условиях, приближенных к условиям эксплуатации реакторов типа ВВЭР.

Рассмотрены актуальные задачи исследований опытных твэлов для перспективных ВВЭР, проведение которых возможно на реакторе ИР-8. В число данных задач, в частности, входит разработка инновационных установок ВВЭР-СКД, совершенствование действующих реакторов за счет создания твэлов толерантного типа, а также совершенствование используемых выгорающих поглотителей. Приведены примеры разработки конструкций АУ для облучения опытных твэлов на реакторе ИР-8. Рассмотрена схема ампульного устройства для испытаний ОТ при СКД-параметрах, условно названного АУ-СКД-1. АУ-СКД-1 представляет собой однотрубное ампульное устройство с одним опытным (вверху) и одним подогревающим твэлом (внизу), расположенными друг над другом.

Схема основных блоков обоснования представительности экспериментов с опытными твэлами в реакторе ИР-8 показана на Рисунке 1 (вопросы, рассматриваемые в настоящей работе, выделены красным).



Рисунок 1 - Схема обоснования представительности экспериментов с ОТ в ИР-8

Обобщая материалы, представленные в первой главе, для разработки и обеспечения представительности реакторных испытаний опытных твэлов для перспективных ЯЭУ в реакторе ИР-8 были сформулированы следующие задачи:

- Обосновать возможность реакторных исследований опытных твэлов и имитаторов твэлов в ампульных устройствах при конвекции теплоносителя с СКД-параметрами в контролируемых и регулируемых условиях, разработав соответствующие схемы проведения эксперимента, его instrumentation, и выполнив теплогидравлические расчеты, обосновывающие корректность разработанных схем;

- Выполнить апробацию новых расчетно-экспериментальных методов определения параметров проведения эксперимента, таких как величины энерговыделения в экспериментальных образцах, облучаемых в ИР-8, а также инерции системы «Термопара – Объект контроля»;

- Провести отработку способа моделирования процессов, проходящих внутри твэлов, облучаемых в АУ в реакторе ИР-8.

**Во второй главе** приведено описание использовавшихся в работе методов исследований, среди которых:

- Использование регуляторов для повышения управляемости ампульного реакторного эксперимента (в частности, ПИД-регулятора (пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор)).



- Нестационарный метод регулярного режима для получения верификационных данных по энерговыделению в образцах. Одно из достоинств данного метода - слабая чувствительность результатов измерений к точности градуировки датчиков температуры в реакторе. В регулярном тепловом режиме закон изменения температурного поля со временем приобретает простую экспоненциальную форму.

- Инструментация экспериментальных образцов термопарами (ТП).

- Программы для расчетов процессов, проходящих внутри твэлов под облучением (в том числе, для оценок распределения температуры внутри инструментированных твэлов). В настоящей работе для решения данных задач использовалась программа, получившая условное название SOTAR (COTAP). SOTAR создана на базе кодов серии PIN. Полученные в SOTAR данные использовались для дальнейших оценок распределения температуры в инструментированных термопарами твэлах. Эти оценки проводились с использованием пакета MathCad.

**В третьей главе** рассмотрены вопросы оптимизации конструкции ампульных устройств для получения представительных данных испытаний на реакторе ИР-8 опытных твэлов проектируемого ВВЭР-СКД. **В первом разделе третьей главы** описаны разработанные подходы к макетированию эксперимента с АУ-СКД-1, а также выбор схемы инструментации твэлов и самого АУ. Проведение макетного реакторного эксперимента с инструментацией твэлов и самого ампульного устройства рассматривается в качестве необходимого мероприятия, направленного на повышение контролируемости параметров испытаний опытных твэлов в среде теплоносителя с СКД-параметрами в АУ-СКД-1. В макетном реакторном эксперименте должны быть получены прямые данные о температуре оболочек испытываемых твэлов, что повысит представительность результатов облучений ОТ в условиях косвенных измерений.

**Во втором разделе третьей главы** рассмотрен реакторный эксперимент с использованием внутриампульной конвекционной петли. Данное ампульное устройство было условно названо АУ-СКД-2. Одной из основных целей разработки АУ-СКД-2 является решение выявленных на первом этапе проектирования подзадач, связанных с обеспечением большей равномерности распределения температур оболочки опытного твэла по высоте и необходимостью проведения реакторного эксперимента в регулируемых и контролируемых условиях. Требуемые значения температуры теплоносителя на уровне верхнего испытываемого образца имитатора твэла в АУ-СКД-2 планируется достигать и поддерживать за счет наличия разделительной трубы с изоляционным зазором, а также благодаря использованию внешних электрических нагревателей, управляемых при помощи ПИД-регулятора. Испытываемый образец в данном случае - имитатор твэла с сердечником из вольфрама и оболочками из кандидатных материалов для твэлов реактора ВВЭР-СКД.

Благодаря наличию разделительной трубы в АУ-СКД-2 образуется циркуляционный контур с подъемным и опускным участком движения теплоносителя (Рисунок 2). Конвекция теплоносителя будет обеспечиваться за счет разности его плотностей на подъемном и опускном участках, учитывая наличие в объеме ампульного устройства разделительной трубы с изоляционным зазором (заполненным, например, СКД-теплоносителем).

Нагреватель расположен между корпусом, несущим давление, и корпусом ампулы (Рисунок 3).

В результате в рабочем объеме АУ-СКД-2 образуется подогретый нижним твэлом поток теплоносителя, который должен обеспечить равномерное распределение температуры по высоте испытываемых образцов. Это сделает результаты эксперимента более представительными. Таким образом, в АУ-СКД-2 реализуется вариант внутриампульной конвекционной петли.

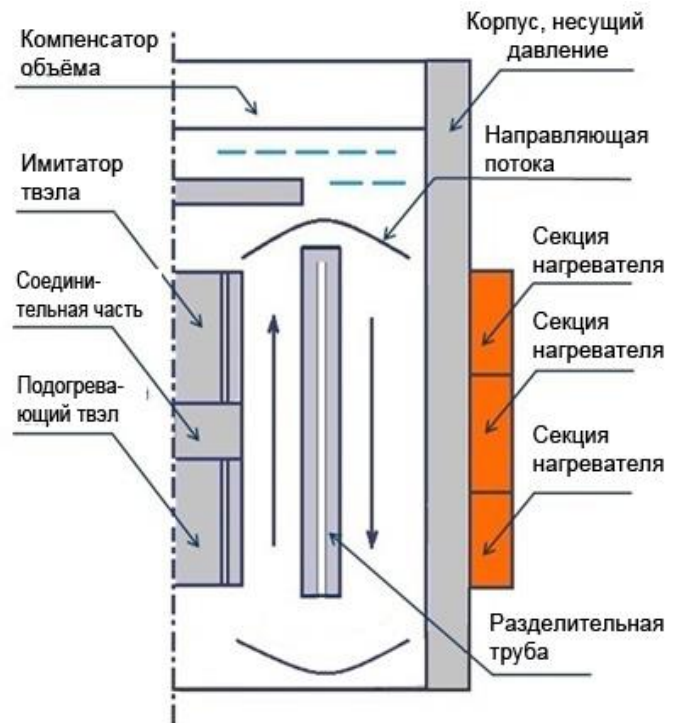


Рисунок 2 - Принципиальная схема циркуляционного контура в АУ-СКД-2



Рисунок 3 - Вариант схемы сечения АУ-СКД-2

Для предварительных оценок теплогидравлических параметров СКД-теплоносителя в АУ-СКД-2 использовалась специально написанная программа в математическом пакете MathCad. С ее помощью были рассчитаны предварительные параметры выхода ампульного устройства на рабочий режим. Расчет проводился с

рядом допущений. Представляется, что использованный подход может применяться при выборе принципиальной схемы конструкции АУ на самых начальных этапах проектирования.

В рамках расчета с использованием разработанной MathCad-программы циркуляционный контур АУ-СКД-2 условно разбивался на подъемный и опускной участок, в каждом из которых по высоте было выделено несколько связанных между собой объемов. Верхние граничные условия для предыдущего объема являлись нижними граничными условиями для текущего. В одном расчетном цикле оценивались изменения температуры и скоростей при одном обороте теплоносителя вокруг разделительной трубы. Результаты определения температур для текущего цикла являлись исходными данными для цикла следующего.

Вначале находили массовый расход теплоносителя, значение которого должно быть одинаковым для каждого объема циркуляционного контура:

$$G = \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{гидр}}}{(\Delta P_{\text{трения}} + \Delta P_{\text{местн}} + \Delta P_{\text{уск}})}} \quad (1)$$

где  $\Delta P_{\text{трения}}$  - падение давления вследствие трения;  $\Delta P_{\text{местн}}$  - потери давления на местных сопротивлениях;  $\Delta P_{\text{уск}}$  - изменение давления из-за ускорения (или замедления) потока;  $\Delta P_{\text{гидр}}$  - изменение давления из-за гидростатического напора.

После определения массового расхода рассчитывались скорости движения теплоносителя в каждом из объемов:

$$W = \frac{G}{\rho * F} \quad (2)$$

где  $G$  – массовый расход;  $\rho$  – средняя плотность теплоносителя и  $F$  – сечение, соответствующее конкретному объему циркуляционного контура АУ.

Полученная матрица скоростей использовалась при расчете в качестве исходных данных для дальнейшего определения температур с учетом влияния уровня энерговыделения в твэле, конструкционных материалах, нагревателе и теплоотвода через внешнюю стенку АУ-СКД и нагреватель. Радиальное изменение температуры в данном случае не учитывалось. Значение коэффициента теплоотдачи для внешней стенки АУ-СКД и нагревателя выбиралось с учетом имеющегося опыта проведения экспериментов по облучению конструкционных материалов в ампульных устройствах.

Для решения задачи по определению температур за основу был взят подход к исследованию одномерных нестационарных температурных полей методом численного эксперимента, предложенный в [1]. Использовалась имеющаяся в MathCad встроенная функция Pdesolve для численного решения одномерных

нестационарных задач. Для каждого объема записывалось уравнение теплового баланса для теплоносителя. Результат численного решения посредством встроеного интегратора Pdsolve выводится как функции  $T(x, \tau)$ .

Уравнения теплового баланса для объемов подъемного участка теплоносителя были записаны следующим образом:

$$T_{\tau}(x, \tau) = \frac{q_{s1} * \frac{u_1}{F_1}}{\rho * C_p} - W_1 * T_x(x, \tau) + \frac{\alpha_{s2} * (T_{s2} - T(x, \tau)) * \frac{u_2}{F_1}}{\rho * C_p} \quad (3)$$

где  $T_{\tau}$  – производная по времени;  $q_{s1}$  – плотность теплового потока на боковой поверхности подогревающего твэла / соединительной части / имитатора твэла;  $u_1 = 2 * \pi * r_3$  и  $u_2 = 2 * \pi * r_4$  – значения периметра сечения, по которому происходит теплообмен на боковой поверхности;  $F$  – сечение конкретного объема подъемного участка;  $W$  – скорость теплоносителя в конкретном объеме;  $\alpha_{s2}$  – значение коэффициента теплоотдачи для разделительной трубы;  $T_{s2}$  – температура на опускном участке, рассчитанная в рамках предыдущего цикла;  $C_p$  – значение теплоемкости при заданной температуре.

Уравнения теплового баланса для объемов опускного участка теплоносителя были записаны как:

$$T_{\tau}(x, \tau) = \frac{\alpha_{s1} * (T_{s1} - T(x, \tau)) * \frac{u_3}{F_2}}{\rho * C_p} - W_4 * T_x(x, \tau) + \frac{q_{s2} * \frac{u_4}{F_2}}{\rho * C_p} + \frac{\alpha_{s3} * (T_{s3} - T(x, \tau)) * \frac{u_4}{F_2}}{\rho * C_p} \quad (4)$$

где  $\alpha_{s1}$  – значение коэффициента теплоотдачи для разделительной трубы;  $\alpha_{s3}$  – коэффициент, использовавшийся для нахождения значения величины теплового потока, передаваемого в бассейн реактора;  $T_{s1}$  – температура на подъемном участке;  $T_{s3}$  – температура воды бассейна реактора;  $q_{s2}$  – плотность теплового потока от стенки (за счет поглощения реакторного излучения) и нагревателя;  $u_3$  и  $u_4$  – значения периметра сечения, по которому происходит теплообмен на боковой поверхности;  $F$  – сечение конкретного объема опускного участка.

Далее в расчете учитывалось влияние движения теплоносителя на уровень температур и на скорость сходимости решения. После этого находили итоговую матрицу температур для данного цикла. Необходимое число расчетных циклов задавалось при вводе исходных данных.

Конструкция АУ-СКД-2 допускает возможность автоматического поддержания необходимой температуры в объеме ампульного устройства с помощью ПИД-регулятора. Измеренная при помощи термопары температура СКД-теплоносителя в контрольном объеме контура сравнивается с уставкой, после чего работа регулятора уменьшает их рассогласование. Использование ПИД-регулятора в данном случае обеспечивает стабильность выхода АУ на режим.

С использованием предложенной MathCad-программы были сделаны расчетные оценки для варианта конструкции АУ-СКД-2 с варьированием размеров некоторых конструктивных элементов ампулы (Рисунки 4 - 5).

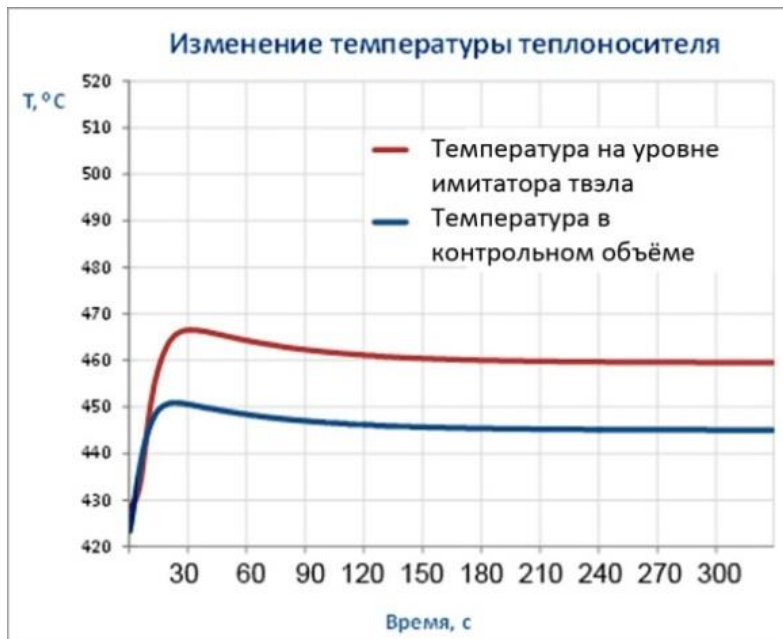


Рисунок 4 - Изменение температуры СКД-теплоносителя от времени для размеров: внутренний радиус разделительной трубы = 6,5 мм, внешний = 8,5 мм, высота соединительной части между образцами = 40 мм

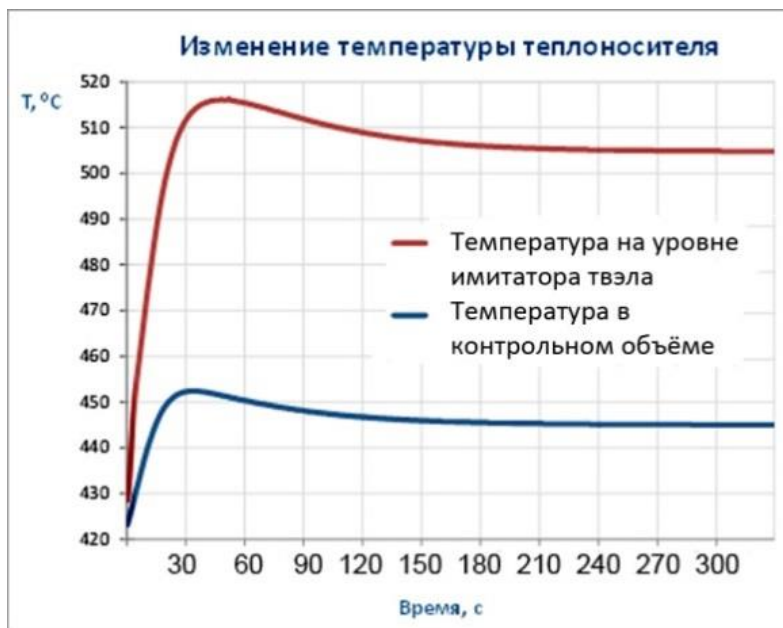


Рисунок 5 - Изменение температуры СКД-теплоносителя от времени для размеров: внутренний радиус разделительной трубы = 4,8 мм, внешний = 6,8 мм, высота соединительной части между образцами = 40 мм

При уменьшении внутреннего и внешнего радиуса разделительной трубы (при сохранении ее толщины) температура теплоносителя на уровне имитатора твэла значительно возрастает. При этом температура теплоносителя в контрольном объеме, управляемая при помощи ПИД-регулятора, через определенное число циклов устанавливается на уровне, заданном уставкой. Согласно проведенным предварительным оценкам теплогидравлических параметров для выбранного варианта конструкции АУ-СКД-2 (Рисунок 5) установившиеся температуры теплоносителя на уровне имитатора твэла могут достигать значений  $\sim 505$  °C; скорость движения теплоносителя в области имитатора твэла достигает  $\sim 0,4$  м/с.

Достоинства рассмотренного варианта АУ-СКД-2:

- Обеспечивается надежная конвекция СКД-теплоносителя в АУ благодаря использованию внутриампульной конвекционной петли.
- Обеспечивается бóльшая высотная равномерность и постоянство температур оболочек исследуемых образцов. Это является важным с точки зрения представительности результатов испытаний и получения материалов для последующих послереакторных исследований.
- Обеспечивается стабильный выход АУ-СКД на рабочий режим.
- Обеспечивается управляемость эксперимента за счет регулируемости процесса достижения и поддержания СКД-параметров.

Таким образом, использование АУ-СКД-2 позволяет получать более представительные экспериментальные данные о температуре оболочек твэлов в среде с СКД-параметрами в контролируемых и регулируемых условиях.

Испытания АУ-СКД-2 с имитаторами твэлов могут стать подготовительным этапом для дальнейших исследований опытных твэлов. Такой эксперимент на реакторе ИР-8 также может рассматриваться в качестве макетного и верификационного. Еще одной задачей, которая может быть решена по результатам реакторных испытаний АУ-СКД-2 с имитаторами твэлов на ИР-8, является выбор оптимальных параметров водно-химического режима для проектируемой установки ВВЭР-СКД.

**В четвертой главе** рассмотрены подходы к совершенствованию методов контроля параметров реакторных испытаний опытных твэлов. **В первом разделе четвертой главы** показана возможность использования метода регулярного теплового режима для определения энерговыделения в образцах. Для подтверждения возможности применения данного метода для определения величины энерговыделения в образцах, облучаемых в реакторе ИР-8, проводились расчеты с использованием экспериментальных данных, полученных при облучении в отражателе реактора образцов конструкционных материалов. Облучение образцов проводилось с использованием специальных экспериментальных устройств (Рисунок 6). Важно, что при проведении данных экспериментов термодары располагались в «критической» точке (радиусе) цилиндра (по терминологии работы [2]). В «критическом радиусе» нестационарный тепловой процесс проходит только в регулярной форме. В таком случае после повышения мощности реактора регулярный режим начинается с самого начала процесса, что учитывалось при расчетах. (Расчеты с применением метода регулярного теплового режима проводились под руководством к.т.н. В.Н. Мурашова.)

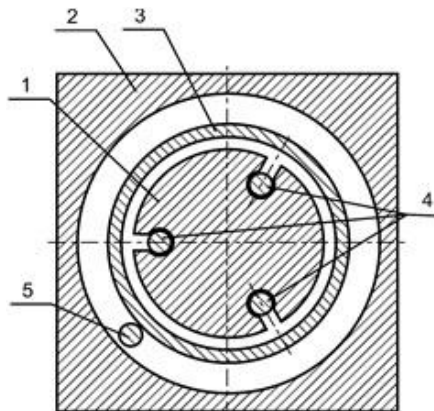


Рисунок 6 - Схема сечения ЭУ с исследуемым образцом, где 1 – образец; 2 – бериллиевый блок отражателя; 3 – канал, заполненный воздухом; 4 – термопары, измеряющие температуру внутри образца; 5 - ТП, контролирующая температуру воды

В третьем ряду отражателя реактора были исследованы образцы из нержавеющей стали (облучался в ячейке 8-5) и титана (облучался в ячейке 8-3). Для расчетов с помощью метода регулярного теплового режима использовались результаты измерений температуры образцов, проводившихся в течение нескольких часов при нестационарных процессах, вызванных ступенчатым изменением мощности реактора ИР-8 (повышалась ступенями 0,5–1 МВт). В работе подробно рассмотрены данные для последней ступени подъема мощности реактора 3,9–4,8 МВт.

После проведения математических преобразований было получено рабочее уравнение, которое может использоваться для нахождения средней величины тепловыделения, при расположении термопары в «критическом» радиусе цилиндрического образца:

$$q_v = m \cdot U_0 \cdot (C_p \cdot \rho) \quad (5)$$

где  $q_v$  – тепловыделение;  $\rho$  – плотность материала;  $C_p$  – удельная теплоемкость материала;  $U_0$  – максимальная избыточная температура;  $m$  – темп регулярного режима ( $U_0$  и  $m$  определяются экспериментально).

Возможность применения уравнения (5) для определения энерговыделения в образцах была продемонстрирована с использованием соответствующих экспериментальных данных и физических свойств материалов образцов. На Рисунке 7 приведены результаты определения с использованием уравнения (5) значений энерговыделения в образцах для всех ступеней при подъеме мощности реактора в процессе эксперимента. Погрешность определения величины энерговыделения в образцах в данном случае составила ~10–15 %. На финальной ступени мощности проводилось сравнение рассчитанных суммарных значений  $q_v$  с данными работы [3], где  $q_v$  определяли по другим расчетным подходам. Из Рисунка 7 видно, что полученные результаты достаточно хорошо согласуются между собой.



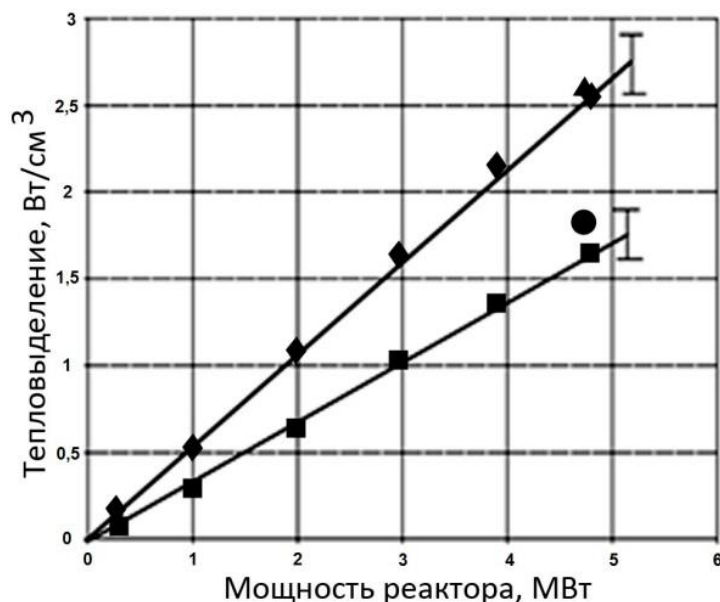


Рисунок 7 - Результаты определения энерговыделения в образцах по показаниям ТП в ячейках 8-5 и 8-3, где:

- ◆ Нестационар, 8-5, сталь
- Нестационар, 8-3, титан
- ▲ Результаты [3], 8-5, сталь
- Результаты [3], 8-3, титан

Таким образом, была продемонстрирована возможность использования нестационарного метода регулярного теплового режима для экспериментального определения величины энерговыделения в образцах, облучаемых в реакторе ИР-8. Метод может, в том числе, применяться для определения энерговыделения в сердечниках опытных ТВЭЛов и имитаторов ТВЭЛов при их испытаниях в АУ-СКД.

**Во втором разделе четвертой главы** рассмотрена отработка предложенного расчетно-экспериментального метода определения величины инерции системы «Термопара - ТВЭЛ» («ТП - объект контроля»).

Практическая реализация метода включает следующие этапы:

- Получение экспериментальных данных (определение инерции образца с закрепленной термопарой, определение инерции ТП относительно макета с использованием электронагрева ТП);
- Проведение качественных оценок по расчетной модели с использованием полученных экспериментальных данных для сравнения различных вариантов инструментации образца;
- Получение итоговых данных об отклонениях показаний ТП от реальной температуры объекта контроля (инерция системы «ТП - объект контроля»).

Для отработки предлагаемого метода был создан лабораторный стенд. На стенде проведены тепловые исследования экспериментального образца (Рисунок 8) с термопарами, закрепленными на его поверхности двумя способами (при помощи хомута и заделкой в паз).



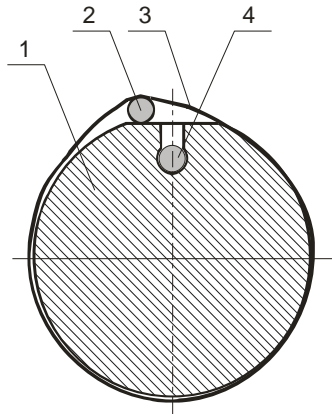


Рисунок 8 - Экспериментальный образец:  
схема сечения образца:

1 – корпус образца; 2 - термопара, контролирующая температуру поверхности; 3 - хомут, прижимающий ТП к поверхности образца; 4 - ТП в пазу, измеряющая температуру поверхности

Была разработана расчетная модель, позволяющая оценивать значения отклонения показаний термопары от реальной температуры образца и инерцию системы «ТП – Объект контроля» с использованием аналитического решения. Написана соответствующая MathCad-программа. Для расчета отставания показаний термопары от температуры образца (в относительном виде) использовалось следующее выражение:

$$T(R, \tau)/\vartheta_0 = \sum_{n=1}^6 A_n J_0(\mu_n R) \frac{\tau_n}{t_0 - \tau_n} (e^{-\frac{\tau}{t_0}} - e^{-\frac{\tau}{\tau_n}}) \quad (6)$$

где  $R$  – безразмерная переменная;  $\tau$  – время основного процесса в твэле и в ТП;  $A_n = \frac{2 \cdot J_1(\mu_n)}{\mu_n \cdot [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]}$  при  $\tau_0 > \tau_1 > \tau_2 \dots \tau_n$ ;  $J_0$  и  $J_1$  – функции Бесселя первого рода (нулевого и первого порядка);  $\mu_n$  – корни уравнения  $J_0(\mu)/J_1(\mu) = \mu/Bi$ ;  $\tau_n$  – экспериментально определенная инерция термопары, закрепленной на образце;  $t_0$  – экспериментально определенная инерция макета.

По результатам апробации расчетной модели с использованием экспериментальных данных рассчитанные максимальные отклонения показаний термопары от реальной температуры образца не превысили 5 %.

Таким образом, был отработан расчетно-экспериментальный метод, применение которого позволяет получить значения инерции термопар, закрепленных на объекте контроля различными способами. Сравнение значений суммарной инерции закрепленных термопар и экспериментального макета также можно использовать для выводов о качестве заделки ТП.

**В третьем разделе четвертой главы** рассмотрен комплексный подход для выбора оптимального способа инструментации твэлов термопарами, сформулированного на основе анализа и систематизации факторов, влияющих на корректность измерения температуры оболочек твэлов в процессе испытаний (инерция термопары и экспериментального образца, ресурс ТП, влияние заделки ТП на движение теплоносителя в объеме АУ и другие). Такой подход рекомендуется использовать при подготовке экспериментов с опытными твэлами на реакторе ИР-8.

**В пятой главе** рассмотрены расчеты внутритвэльных процессов, которые являются частью обоснования испытаний на реакторе ИР-8 опытных твэлов (в том числе, инструментированных). **В первом разделе пятой главы** приведена схема моделирования процессов внутри твэла при его облучении в АУ в реакторе ИР-8, показана взаимосвязь необходимых расчетных обоснований. **Во втором разделе пятой главы** рассмотрена отработка способа моделирования процессов внутри твэла с использованием разработанной программы SOTAR. Программа SOTAR может использоваться для расчетов процессов в цилиндрических твэлах с сердечником из диоксида урана и оболочками из различных материалов, включая оболочки для инновационных ВВЭР. Для подтверждения корректности расчёта твэлов с топливом из  $UO_2$  и оболочкой из циркониевых сплавов проводилось сравнение результатов расчётов в SOTAR с данными испытаний твэлов в рамках советско-финской исследовательской программы СОФИТ (СОФИТ 1.1., 1985–1986 гг.).

При адаптации SOTAR для расчетов процессов в твэлах толерантного типа (АТФ-твэлы) и твэлах проектируемого реактора ВВЭР-СКД были внесены необходимые изменения в подпрограммы для расчёта процессов в оболочках, с учётом свойств и моделей, описывающих поведение кандидатных материалов оболочек данных твэлов. В качестве твэла толерантного типа рассматривался твэл с сердечником из  $UO_2$  и с оболочкой из FeCrAl, так как по моделированию испытаний данного твэла опубликованы результаты исследований, проводившихся МАГАТЭ [4]. В качестве твэла проектируемого реактора ВВЭР-СКД рассматривался твэл с  $UO_2$  и с оболочкой из стали ЧС-68-ИД хд.

Для АТФ-твэла с параметрами и условиями облучения, приведенными в [4], были выполнены расчеты в SOTAR, анализ результатов которых позволил провести частичную верификацию программы при выгораниях до  $\sim 35$  МВт сут/кг.

Для твэла с оболочкой из FeCrAl и с сердечником из  $UO_2$  в SOTAR было проведено моделирование процессов, проходящих внутри твэла при его облучении в АУ в реакторе ИР-8 при заданных условиях. В качестве исходных данных использовались параметры твэла из [4], условия его охлаждения теплоносителем, а также результаты нейтронно-физических расчетов. (Здесь и далее нейтронно-физические расчеты проводились сотрудниками ЛФТИР под руководством к.т.н. Ю.Е. Песни).

Для твэлов проектируемого реактора ВВЭР-СКД при моделировании их параметров с использованием SOTAR предполагалось, что облучение в реакторе ИР-8 проводится в АУ-СКД-1 с разделительной трубой с одним опытным и одним подогревающим твэлом (ПТ). Давление в АУ - 30 МПа. Температура оболочки ОТ должна составлять  $\sim 550$  °С. Показана взаимосвязь расчетов в SOTAR с теплогидравлическими и нейтронно-физическими расчетами. В числе исходных данных SOTAR заданы параметры охлаждения твэлов. Используемые значения коэффициентов теплоотдачи от твэла к СКД-теплоносителю лежат в диапазоне

3000 – 4000 Вт/м<sup>2</sup>·°С. Данные по изменению мощности твэлов при облучении, профили энерговыделения по высоте получены в результате нейтронно-физических расчетов в MCU-PTR. Были определены распределения мощности участков твэлов по высоте для различных состояний реактора в течение его цикла работы с одной загрузкой. Предполагалось, что данные состояния будут аналогичны для последующих циклов работы реактора. Компенсирование падения мощности твэлов вследствие выгорания достигалось пропорциональным увеличением мощности реактора для поддержания требуемых температур. Средняя по высоте линейная тепловая нагрузка твэлов приведена на Рисунке 9.

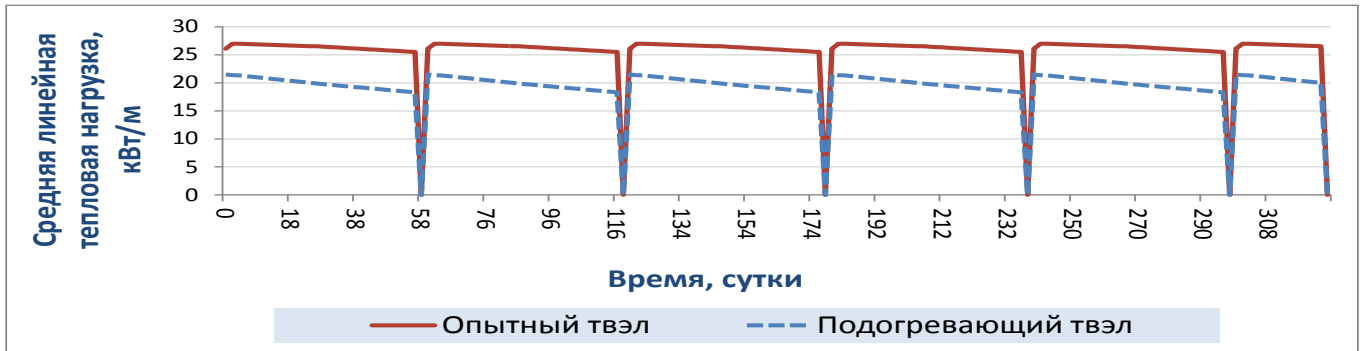
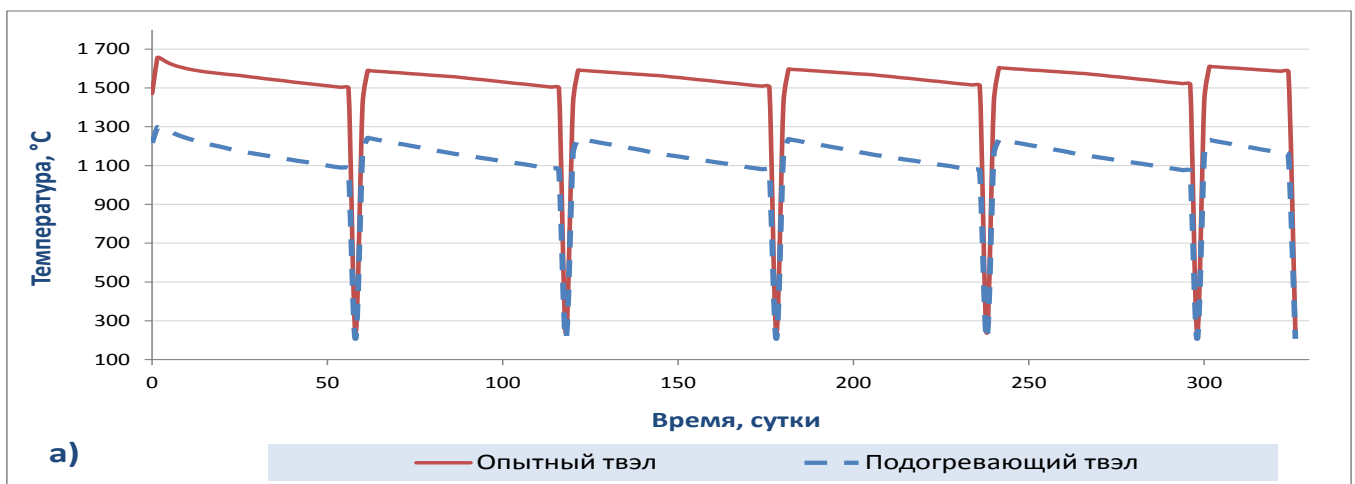


Рисунок 9 - Средняя по высоте линейная тепловая нагрузка ОТ и ПТ

На Рисунке 10 приведены графики изменения параметров опытного и подогревающего твэлов при их облучении в АУ-СКД, полученные в программе SOTAR.



а)



Рисунок 10 – Центральная температура топлива ОТ и ПТ (средняя плоскость топливного столба): а) температуры ОТ и ПТ, б) температура ОТ подробно

Из графиков видно, что полученные значения являются приемлемыми (не превышают температуру плавления). При циклическом снижении мощности реактора температура топлива ТВЭЛов также сильно уменьшается. Увеличение температуры топлива ТВЭЛов в начале облучения (Рисунок 10) может быть объяснено влиянием доуплотнения диоксида урана (что существенно на данном этапе) и, как следствие, увеличением зазора между топливом и оболочкой. Динамика определяемых при расчете параметров зазора показывает, что в дальнейшем происходит уменьшение его величины и при этом снижается его проводимость за счет выхода газообразных продуктов деления. Небольшой рост температуры топлива опытного ТВЭЛ (Рисунок 10, б) при его более длительном облучении (250–300 суток) обусловлен более значимым влиянием со стороны ухудшения проводимости зазора между топливом и оболочкой.

На Рисунке 11 приведены полученные в SOTAR графики изменения внутреннего давления в ТВЭлах от времени облучения.

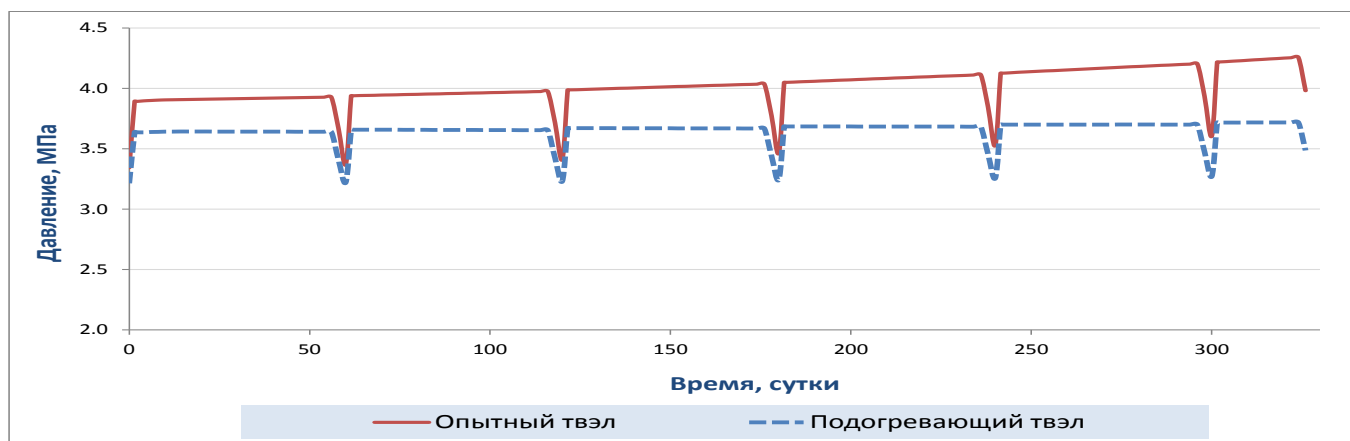


Рисунок 11 – Изменение внутреннего давления в ОТ и ПТ

Динамика температуры внешней поверхности оболочки опытного и подогревающего твэлов показана на Рисунке 12.

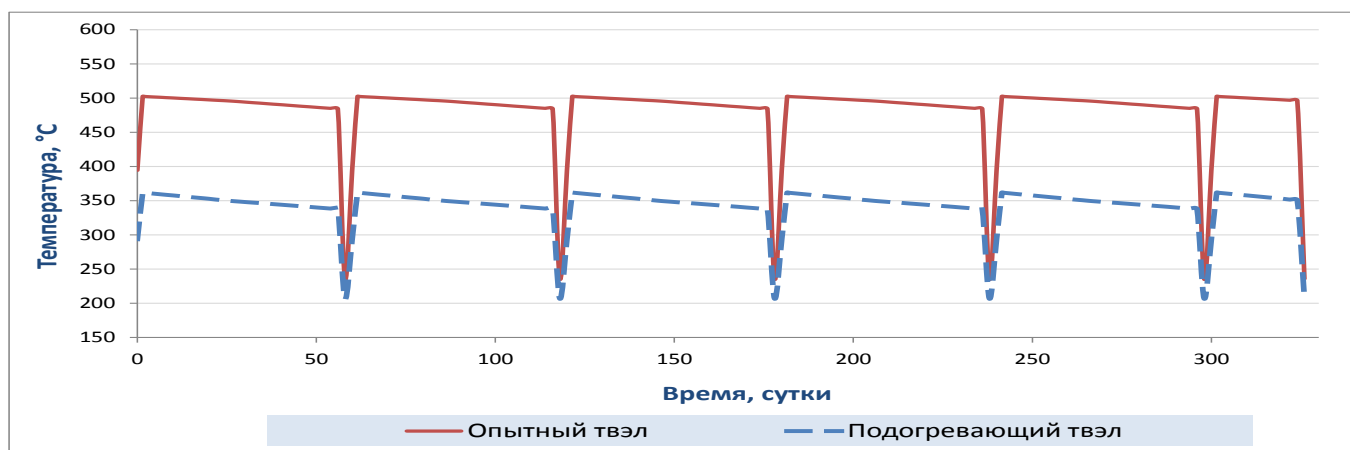


Рисунок 12 – Температура внешней поверхности оболочки ОТ и ПТ (средняя плоскость твэла)

Данные Рисунка 12 показывают, что в процессе облучения опытного твэла в ампульном устройстве температуры внешней поверхности его оболочки в области, соответствующей по высоте середине топливного столба, находятся на уровне ~500 °C. Максимальное изменение температуры внешней поверхности оболочки по высоте опытного твэла составляет в данном случае ~100 °C (что характерно для конструкции типа АУ-СКД-1).

**В третьем разделе пятой главы** рассмотрен способ оценки влияния инструментации твэлов на распределение температур в оболочке и топливе испытываемого твэла. Расчеты проводились в разработанной MathCad-программе. Исходные данные для расчета в MathCad - параметры твэла и результаты, полученные при расчетах в SOTAR для не инструментированных твэлов на конкретном расчетном шаге. Рассмотрены различные варианты качества заделки термопары в оболочку твэла. Результаты расчетов распределения температур в радиальном сечении (центральное положение по высоте) для инструментированного ТП подогревающего твэла представлены на Рисунке 13.

Из Рисунка 13 видно, что в случае (1) хорошей заделки (без зазора) наличие слоя термопар типа ХА практически не влияет на радиальное распределение температур в твэле. В случае (2), когда между ТП и оболочкой имеется зазор, заполненный воздухом, центральная температура топлива повышается.

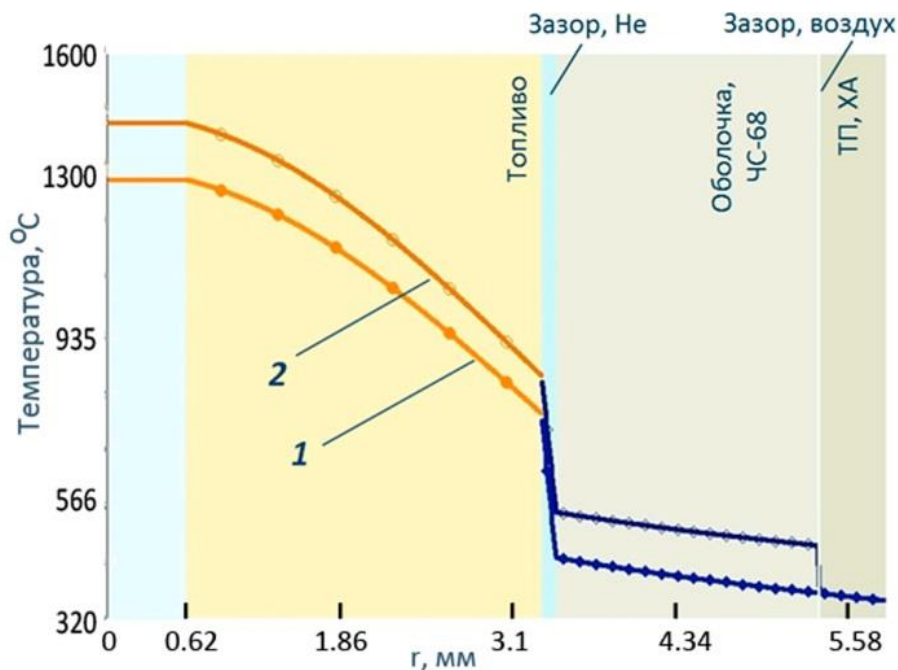


Рисунок 13. Радиальное распределение температур для инструментированного подогревающего твэла, где 1) хорошая заделка ТП; 2) заделка, когда между ТП и оболочкой имеется зазор, заполненный воздухом

Таким образом, с использованием программы SOTAR был отработан способ моделирования процессов внутри опытных твэлов инновационных ВВЭР при их облучении в ампульном устройстве в реакторе ИР-8. С использованием программы SOTAR и специально написанной MathCad-программы были получены результаты радиального распределения температур в твэлах проектируемого ВВЭР-СКД, инструментированных термопарами. Была продемонстрирована возможность сравнения распределения температур в твэлах с различным качеством заделки термопар на оболочке. Был разработан инструмент расчета радиального распределения температур в твэле, с заделанными на оболочке термопарами, который может использоваться при выборе способа инструментации.

### Выводы

1. Отработаны способы обеспечения представительности результатов испытаний опытных твэлов для перспективных ЯЭУ в исследовательском реакторе ИР-8. Рассмотрены варианты проведения ампульных экспериментов с опытными твэлами для инновационных ВВЭР в широком диапазоне параметров, включая сверхкритические параметры водяного теплоносителя.

2. В работе представлены схемы конструкций ампульных устройств для облучения в реакторе ИР-8 опытных твэлов и имитаторов твэлов для проектируемого ректора ВВЭР-СКД.

3. Для ампульного устройства с опытными твэлами проработаны схемы инструментации твэлов и самого АУ, позволяющие получать необходимые данные о температурах оболочек испытываемых твэлов в условиях косвенных измерений.

4. Предложена конструкция АУ с внутриампульной конвекционной петлей, которая позволяет проводить испытания имитаторов твэлов в среде СКД-теплоносителя в контролируемых и регулируемых условиях. Сделаны оценки теплогидравлических параметров теплоносителя для данного варианта ампульного устройства.

5. В рамках настоящей работы была проведена отработка методов контроля параметров опытных твэлов (энерговыведение, температура) при реакторных испытаниях.

6. Показана возможность применения нестационарного метода регулярного теплового режима для определения величины энерговыведения в образцах. Был отработан усовершенствованный подход к использованию метода при соблюдении конкретного способа инструментации цилиндрического образца термопарами (установка ТП в «критическом» радиусе цилиндра). Метод регулярного режима может применяться для оценок энерговыведения в опытных твэлах и имитаторах твэлов при их испытаниях в АУ-СКД.

7. Проведена разработка и апробация расчетно-экспериментального метода определения инерции системы «Термопара - Объект контроля». Результаты применения данного метода можно использовать для выводов о качестве заделки ТП на образце.

8. В результате проведенного анализа факторов, влияющих на корректность измерения температуры оболочек твэлов в процессе испытаний, были сформулированы положения комплексного подхода для выбора наиболее оптимального способа инструментации опытных твэлов термопарами.

9. На примере твэлов проектируемого ВВЭР-СКД и опытных твэлов толерантного типа показана взаимосвязь оценок внутритвэльных процессов под облучением с другими расчетными обоснованиями ампульных реакторных испытаний. При помощи разработанной программы SOTAR проведены расчеты динамики внутритвэльных процессов под облучением для твэлов, испытания которых планируются в реакторе ИР-8, с использованием АУ.

10. Разработан инструмент для оценок радиального распределения температур в твэле с заделанными на оболочке термопарами. Продемонстрирована возможность проведения сравнительного анализа распределения температур в твэлах, учитывая различное качество заделки ТП на оболочке.

11. Обоснована принципиальная возможность проведения в реакторе ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт» ампульных испытаний опытных твэлов для проектируемого ректора ВВЭР-СКД и опытных твэлов толерантного типа в контролируемых и регулируемых условиях.

## Список литературы

1. Солодов А.П. Тепломассообмен в энергетических установках, электронный курс [Электронный ресурс: [http://tw.t.mpei.ac.ru/solodov/hmt-ebook\\_2009/](http://tw.t.mpei.ac.ru/solodov/hmt-ebook_2009/)] Дата обращения (20.02.24).
2. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры. Ленинград, Энергоатомиздат, 1990. 255 с.
3. Трофимчук В.В., Насонов В.А., Ерак Д.Ю., Песня Ю.Е., Кругликов А.Е., Михин О.В. Определение энерговыделения от гамма-излучения в экспериментальных каналах реактора ИР-8. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2022. – Вып. 5. – С. 20-29.
4. Анализ и экспериментальное исследование топлива для водоохлаждаемых реакторов с повышенной устойчивостью к авариям (АКТОФ). Заключительный доклад по проекту координированных исследований // IAEA-TECDOC-1921. МАГАТЭ. Вена, 2022.

## Список работ, опубликованных по теме диссертации

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Арефинкина С.Е., Абрамов А.Н., Бабенко А.В., Белянин В.С., Герстле А.Д., Ерак Д.Ю., Ефремов П.К., Михин О.В., Мурашов В.Н., Яковлев В.В. Разработка облучательных ампульных устройств для реакторных исследований свойств оболочек твэлов в среде теплоносителя с СКД-параметрами // Вопросы атомной науки и техники, Серия: Физика ядерных реакторов. – 2023. – Вып. 5. – С. 65–74.
2. Арефинкина С.Е., Герстле А.Д., Ерак Д.Ю., Ефремов П.К., Кругликов А.Е., Михин О.В., Мурашов В.Н., Насонов В.А., Песня Ю.Е., Трофимчук В.В., Яковлев В.В. Расчётное моделирование параметров опытных твэлов толерантного типа при их испытании в реакторе ИР-8 // Вопросы атомной науки и техники, Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2023. – Вып. 4. – С. 87–100.
3. Арефинкина С.Е., Абрамов А.Н., Бабенко А.В., Ерак Д.Ю., Ефремов П.К., Михин О.В., Яковлев В.В. Использование метода регулярного теплового режима для определения тепловыделения в конструкционных материалах отражателя реактора ИР-8 // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – Вып. 4. – С. 73–85.
4. Arefinkina S.E., Abramov A.N., Babenko A.V., Gerstle A.D., Dmitrieva N.A., Erag D.Yu., Efremov P.K., Mikhin O.V., Nichiporenko Yu.B., Yakovlev V.V. Computational and experimental method for determination of the inertia of thermocouples within the framework of pre-reactor tests of experimental fuel rods. // Physics of Atomic Nuclei. – 2023. – Vol. 86. – No. 12. – P. 2577–2584.

*Направлены в редакции изданий, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Арефинкина С.Е., Герстле А.Д., Дмитриева Н.А., Ерак Д.Ю., Ефремов П.К., Кругликов А.Е., Михин О.В., Мурашов В.Н., Папина В.Б., Песня Ю.Е., Трофимчук В.В., Яковлев В.В. Расчет параметров опытных твэлов при их



испытаниях в реакторе ИР-8 с использованием ампульных устройств, обеспечивающих охлаждение СКД-теплоносителем // Вопросы атомной науки и техники, Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2024.

2. С.Е. Арефинкина, А.Н. Абрамов, А.В. Бабенко, А.Д. Герстле, Н.А. Дмитриева, Д.Ю. Ерак, П.К. Ефремов, О.В. Михин, Ю.Б. Ничипоренко, В.В. Яковлев Расчетно-экспериментальный метод определения инерции термопар в рамках дореакторных испытаний образцов опытных твэлов // Ядерная физика и инжиниринг. – 2024.

#### *Материалы конференций:*

1. Абрамов А.Н., Арефинкина С.Е., Ерак Д.Ю., Лубина А.С., Михин О.В., Насонов В.А., Песня Ю.Е., Яковлев В.В. Техника и методика исследований в реакторе ИР-8 опытных твэгов с уран-гадолиниевой топливной композицией, Всероссийская молодёжная конференция «Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения»: тезисы докл. (Дмитровград, 27–29 марта 2018 г.). – Дмитровград: АО ГНЦ НИИАР, 2018. – С. 7-8.

2. Арефинкина С.Е., Ерак Д.Ю., Михин О.В., Яковлев В.В., Седов А.А., Трофимчук В.В., Абрамов А.Н., Бабенко А.В. Обоснование возможности исследований на реакторе ИР-8 поведения опытных толерантных твэлов в условиях, максимально приближенных к натурным //Международная конференция молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам: сб. докл. (Подольск, 2019), Подольск, ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2019, – С. 200-204.

3. Eрак D.Yu., Arefinkina S.E., Nasonov V.A., Yakovlev V.V., Mikhin O.V., Sedov A.A., Pesnya Yu.E., Trofimchuk V.V., Abramov A.N., Babenko A.V. Possibility substantiation of experimental FE with advanced fuel types behavior investigations at IR-8 reactor in closest to full-scale conditions // 13th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support : Proceedings of the Conference (Nessebar, Bulgaria, September. 15-21, 2019) Nessebar, Bulgaria, P. 332.

4. Абрамов А.Н., Арефинкина С.Е., Герстле А.Д., Ефремов П.К., Михин О.В., Мурашов В.Н. Моделирование параметров ПИД-регулятора нагревателя в ампульном реакторном эксперименте // Курчатовская междисциплинарная молодёжная научная школа : сб. аннотаций (Москва, 20–23 марта 2023 г.) – Москва: ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт», 2023. – С.350.

5. Абрамов А.Н., Арефинкина С.Е., Бабенко А.В., Герстле А.Д., Ерак Д.Ю., Ефремов П.К., Михин О.В., Мурашов В.Н., Насонов В.А., Седов А.А., Яковлев В.В. Особенности проведения на реакторе ИР-8 ампульных испытаний опытных твэлов в условиях естественной конвекции // Межотраслевая научно-техническая конференция «Реакторные материалы атомной энергетики»: сб. тезисов докл. (Екатеринбург, 11 - 15 сентября 2023 г.). – Екатеринбург, 2023. – М.: «Перо», 2023. – 99 с.

6. Ефремов П.К., Абрамов А.Н., Арефинкина С.Е., Герстле А.Д., Ерак Д.Ю., Михин О.В., Мурашов В.Н. Моделирование параметров выхода на режим ампульного устройства для реакторных исследований кандидатных материалов оболочек твэлов, Новые материалы: Перспективные технологии получения материалов и методы их исследования // 21-ая Международная школа-конференция им. Б.А. Калина для молодых ученых и специалистов: сб. тезисов докл. (Москва, 17–19 октября 2023 г.) – Москва: НИЯУ «МИФИ», 2023. – С. 88-89.
7. Арефинкина С.Е., Абрамов А.Н., Бабенко А.В., Ерак Д.Ю., Ефремов П.К., Михин О.В., Мурашов В.Н., Яковлев В.В. Применение метода регулярного теплового режима для оперативного контроля тепловыделения в конструкционных материалах в процессе их облучения. Новые материалы: Перспективные технологии получения материалов и методы их исследования // 21-ая Международная школа-конференция им. Б.А. Калина для молодых ученых и специалистов: сб. тезисов докл. (Москва, 17–19 октября 2023 г.) – Москва: НИЯУ «МИФИ», 2023. – С. 86-87.
8. Арефинкина С.Е., Ерак Д.Ю., Ефремов П.К., Михин О.В., Мурашов В.Н., Яковлев В.В. Возможности проведения на исследовательском реакторе ИР-8 топливных экспериментов в поддержку проекта ВВЭР-СКД. Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики // VI Международная научно-техническая конференция (Москва, 14–17 ноября 2023 г.): сб. тезисов докладов – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2023. – С. 140.