

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н. Ерак Дмитрий Юрьевич

Москва - 2024 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Планирование и проведение реакторных испытаний опытных твэлов. Контроль параметров эксперимента	14
1.1. Подходы к планированию и проведению реакторных экспериментов с опытными твэлами	14
1.2. Основные принципы разработки ампульных устройств для испытаний опытных твэлов	22
1.3. Примеры реакторных испытаний опытных твэлов и разработки облучательных устройств	24
1.4. Моделирование параметров твэлов в процессе эксплуатации	26
1.5. Реактор ИР-8 для проведения экспериментов с опытными твэлами	27
1.6. Опыт по проведению исследований опытных твэлов и топливных композиций на реакторе ИР-8	32
1.7. Примеры актуальных задач исследований опытных твэлов для перспективных ВВЭР, проведение которых возможно на реакторе ИР-8	34
1.7.1. Общие положения	34
1.7.2. Исследования опытных твэлов при параметрах эксплуатации реакторов ВВЭР	34
1.7.2.1. Обзор актуальных задач по совершенствованию выгорающих поглотителей и при разработке твэлов толерантного типа	34
1.7.2.2. Примеры разработки конструкции ампульного устройства для облучения опытных твэлов на реакторе ИР-8 при параметрах ВВЭР	38
1.7.3. Исследования опытных твэлов при СКД-параметрах	41
1.7.3.1. Выбор материалов оболочек твэлов и параметров водно-химического режима при проектировании ВВЭР-СКД	41
1.7.3.2. Пример разработки конструкции ампульного устройства для облучения опытных твэлов проектируемого ВВЭР-СКД на реакторе ИР-8	48
1.8. Способы инструментации твэлов для контроля температуры	51
1.8.1. Общие положения	51
1.8.2. Опыт термометрирования твэлов в реакторных экспериментах	52

1.8.3. Факторы, влияющие на точность измерений температуры твэлов	55
1.9. Постановка задачи работы	58
2. Методы исследования	61
2.1. Использование регуляторов для повышения управляемости ампульного реакторного эксперимента	61
2.2. Нестационарный метод регулярного режима для получения верификационных данных по энерговыделению в образцах	62
2.3. Инструментация экспериментальных образцов термопарами	63
2.4. Программы для расчетов процессов, проходящих внутри твэлов под облучением (в том числе, для оценок распределения температуры внутри инструментированных твэлов)	64
3. Оптимизация конструкции ампульных устройств для получения представительных данных испытаний на реакторе ИР-8 опытных твэлов проектируемого ВВЭР-СКД	66
3.1. Макетирование эксперимента, выбор схемы инструментации твэлов и АУ	66
3.2. Реакторный эксперимент с использованием внутриампульной конвекционной петли	71
3.2.1. Схема конструкции АУ с внутриампульной конвекционной петлей	71
3.2.2. Оценки теплогидравлических параметров АУ с внутриампульной конвекционной петлей	75
3.2.2.1. Алгоритм расчета	75
3.2.2.2. Результаты расчетных оценок	82
3.2.3. Схема инструментации имитаторов твэлов и АУ с внутриампульной конвекционной петлей	86
Заключение по разделу 3	87
4. Совершенствование методов контроля параметров реакторных испытаний опытных твэлов	90
4.1. Использование метода регулярного теплового режима для определения энерговыделения в образцах	90
4.2. Отработка расчетно-экспериментального метода определения величины инерции системы «термопара-твэл»	99
4.2.1 Общие положения	99

4.2.2. Экспериментальная составляющая метода определения инерции термопар	99
4.2.3. Обработка экспериментальных данных	103
4.2.4. Описание аналитической модели для определения погрешности при измерениях температуры образца	106
4.2.5. Апробация и верификация предложенной аналитической модели	108
4.3. Комплексный подход к выбору способа инструментации твэлов при проведении реакторных экспериментов	110
Заключение по разделу 4	111
5. Расчеты внутритвэльных процессов как часть обоснования испытаний опытных твэлов на реакторе ИР-8 (в том числе, инструментированных)	114
5.1. Схема моделирования процессов внутри твэла при его облучении в АУ в реакторе ИР-8	114
5.2. Отработка схемы моделирования процессов внутри твэла с использованием разработанной программы SOTAR	115
5.2.1. Адаптация SOTAR для расчетов процессов в твэлах инновационных ВВЭР	115
5.2.2. Отработка моделирования процессов внутри твэла толерантного типа при его испытаниях в реакторе ИР-8	121
5.2.3. Отработка моделирования процессов внутри твэлов для проектируемого ВВЭР-СКД при их испытаниях в реакторе ИР-8	126
5.3. Способ оценки влияния инструментации твэлов на распределение температур в оболочке и топливе испытываемого твэла	135
Заключение по разделу 5	138
Выводы	140
Список сокращений	142
Список использованной литературы	143

Введение

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. [1, 2] 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 внутриапульной конвекционной петли.
- Проведена апробация применения нестационарного метода регулярного теплового режима (с установкой термодпары 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 термодарами).

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 термодарами 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.

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., Erak 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.

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. (Димитровград, 27–29 марта 2018 г.). – Димитровград: 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. Erak 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. // 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.

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.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность:

- Своему научному руководителю д.т.н. Д.Ю. Ераку за научное руководство и поддержку на всех этапах выполнения работы;
- К.т.н. В.В. Яковлеву и к.т.н. В.Н. Мурашову за ценные консультации, замечания и обсуждение работы;
- А.Д. Герстле и П.К. Ефремову за важные замечания, а также за помощь при верификации программы SOTAR и при выборе параметров ПИД-регулятора, использовавшегося в процессе моделирования циркуляции СКД-теплоносителя;

- к.т.н. Ю.Е. Песне, к.т.н. В.В. Трофимчуку, А.Е. Кругликову за предоставление данных нейтронно-физических расчетов, использовавшихся при моделировании в программе SOTAR;

- О.В. Михину, А.Н. Абрамову, А.В. Бабенко за ценные замечания и предоставление экспериментальных данных о температуре образцов, которые использовались при расчетах с применением метода регулярного теплового режима;

- Ю.Б. Ничипоренко за помощь в получении экспериментальных данных о температуре образцов, которые использовались при определении инерции системы «Термопара – Объект контроля»;

- Всему коллективу ОРИПЭЯР за поддержку;

- Своей семье за поддержку и терпение.

1. Планирование и проведение реакторных испытаний опытных ТВЭЛОВ. Контроль параметров эксперимента

1.1. Подходы к планированию и проведению реакторных экспериментов с опытными ТВЭлами

Испытания конструкционных и топливных материалов могут проводиться в реакторах различного назначения. Исследовательские реакторы (ИР) являются наиболее приспособленными для решения данных задач. ИР можно классифицировать, в частности, по конструкции и номинальной мощности. Каждый исследовательский реактор обладает разными возможностями для проведения экспериментов. [3, 4]

Наиболее широкое применение нашли исследовательские реакторы бассейнового типа. Их активная зона (АЗ) находится в специальном бассейне под слоем воды. Каналы для облучения могут располагаться как в активной зоне, так и вблизи ее в отражателе. Еще одним распространенным типом ИР являются корпусные реакторы, активная зона которых находится в корпусе с водой под давлением. Также существуют ИР канального типа. [5, 4, 6]

К исследовательским реакторам бассейнового типа относятся, например, реакторы ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт» (г. Москва), ИВВ-2М АО «ИРМ» (г. Заречный), ИРТ НИЯУ «МИФИ» (г. Москва). [5, 7] К реакторам корпусного типа относится, например, реактор СМ АО «ГНЦ НИИАР» (г. Димитровград). Примером реакторов канального типа, погруженным в бассейн с водой, является действующий в АО «ГНЦ НИИАР» реактор МИР, а также эксплуатировавшийся в Курчатовском институте в 1963 – 1992 годах реактор МР. Конструкция таких установок позволяет совместить основные преимущества бассейновых и канальных реакторов. [5, 6, 8, 9] В период своей эксплуатации МР был наиболее эффективно использовавшимся среди петлевых реакторов материаловедческим реактором мира. [6] На Рисунках 1.1 - 1.3 в качестве примера приведены схемы исследовательских реакторов различных типов.

В числе преимуществ реакторов бассейнового типа отмечают то, что их конструкция и отсутствие давления позволяют обеспечить наибольшую доступность к зоне облучения, а также простоту используемых облучательных устройств. Недостатки

в данном случае связаны с относительно невысокой плотностью нейтронного потока (порядка 10^{14} н/см²·с), которая обусловлена ограниченной удельной мощностью. [4]

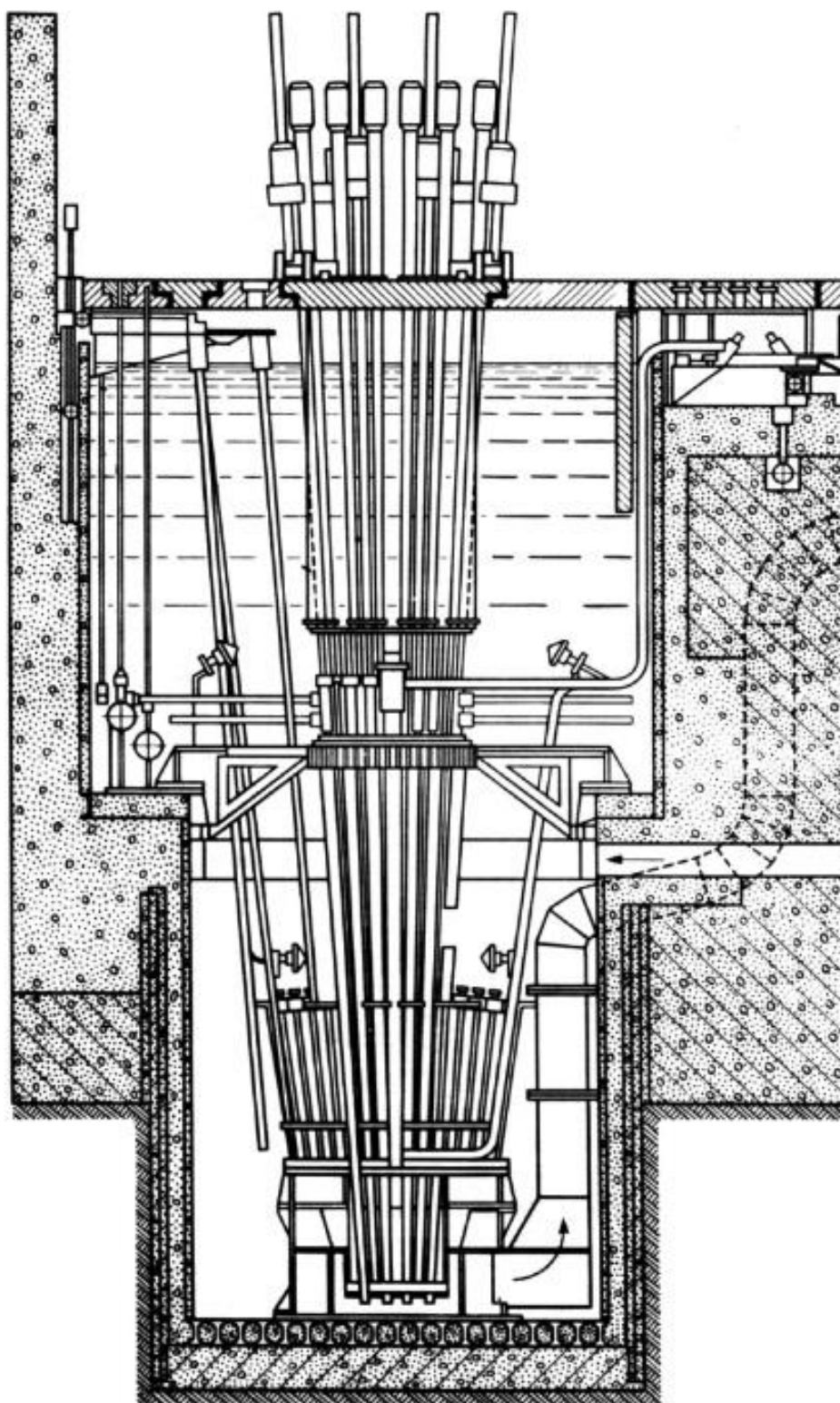


Рисунок 1.1 - Схема реактора МР канального типа, погруженного в бассейн с водой [6]

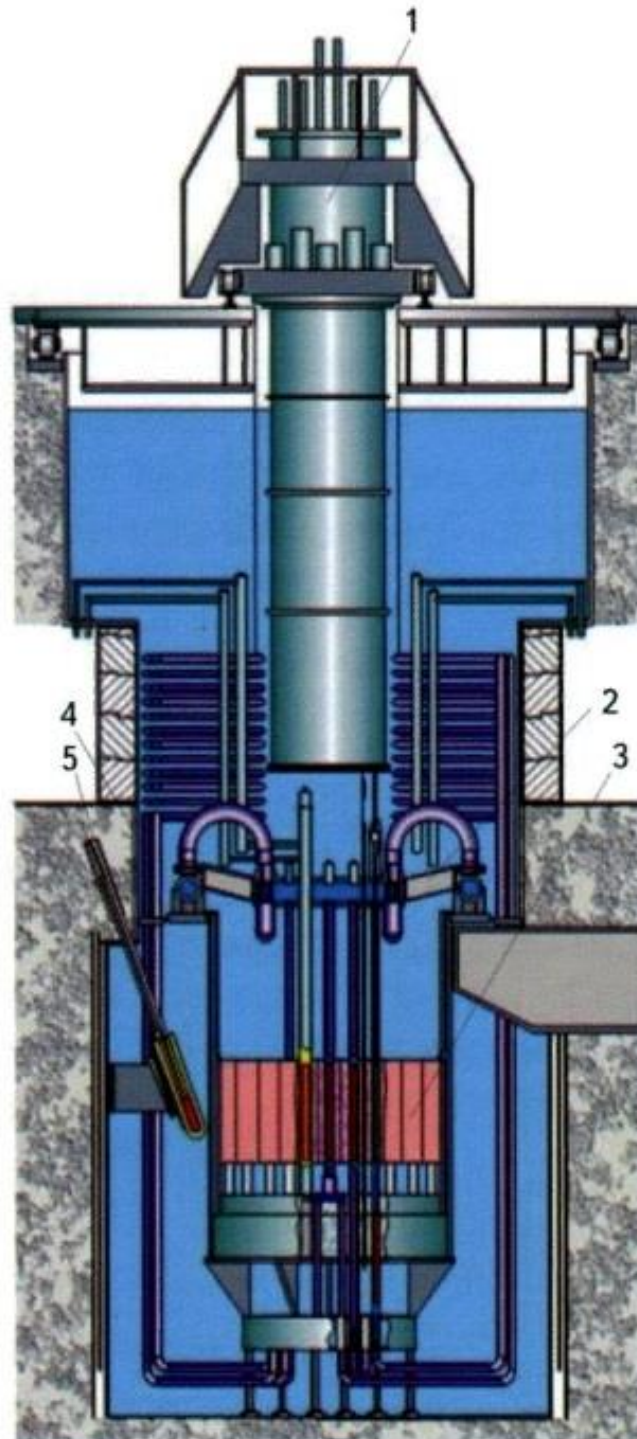


Рисунок 1.2 - Схема реактора МИР канального типа, погруженного в бассейн с водой, где 1 – площадка приводов СУЗ, 2 – система подводящих коллекторов, 3 – активная зона, 4 – система отводящих трубопроводов, 5 – ионизационная камера [5]

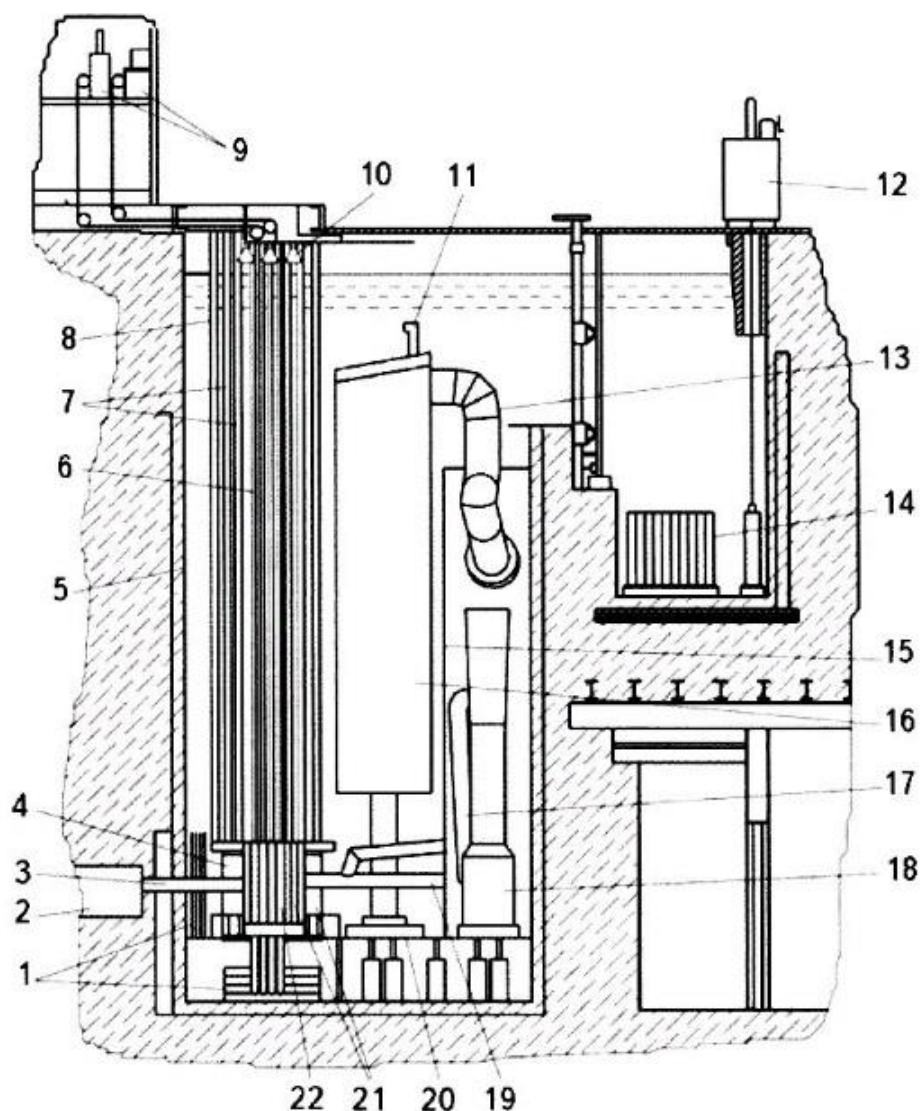


Рисунок 1.3 - Продольный разрез реактора ИР-8 бассейнового типа, где 1 – стальные экраны, 2 – шибер ГЭК, 3 – ГЭК, 4 – корпус реактора, 5 – бак реактора, 6 – каналы со стержнями СУЗ, 7 – ВЭК, 8 – каналы СУЗ, 9 – приводы стержней СУЗ, 10 – душирующее устройство, 11 – воздушник, 12 – контейнер транспортный, 13 – трубопровод всасывающий, 14 – хранилище ОТВС, 15 – вертикальная перегородка, 16 – бак задерживающий, 17 – трубопровод напорный, 18 – эжектор, 19 – ультрахолодный канал, 20 – разделительное дно, 21 – бериллиевый отражатель, 22 – ТВС [5]

В настоящей работе рассматривается подготовка, обоснования и особенности реализации представительных ампульных испытаний опытных ТВЭЛов в реакторе бассейнового типа ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт».

В работе [10] варианты облучения материалов классифицируются по двум основным признакам: по величине энерговыделения в образцах и по температуре

испытаний. Опытные твэлы (с высокообогащенным топливом) относятся к группе со значительным удельным энерговыделением, а конструкционные материалы, а также твэлы с низкообогащенным топливом - к группе с небольшим энерговыделением. Испытания материалов могут проводиться, как при температуре, близкой к температуре окружающей среды, так и при более высоких температурах. [10].

В исследовательском реакторе облучение образцов конструкционных материалов (КМ) и топливных композиций, а также опытных твэлов и ТВС может проводиться, как в активной зоне, так и в боковом отражателе, где для этого предусматриваются специальные полости. В активной зоне такие полости могут создаваться благодаря извлечению одной или нескольких ТВС, составляющих АЗ. Полости в отражателе образуются либо после извлечения части его блоков, либо специальные отверстия предусматриваются в самих блоках. В качестве бокового отражателя в ИР чаще всего используется бериллий и графит. В полости для облучения вводятся специальные устройства (облучательные устройства) с испытываемыми образцами. [4]

Часто испытания необходимо проводить в средах с параметрами, которые отличаются от параметров теплоносителя исследовательского реактора. Поэтому в полости для облучения помещают специальные экспериментальные каналы или каналы облучения, которые отделяют теплоноситель реактора от среды, где испытываются образцы. [3, 4]

По способам теплоотвода и обеспечения режимов температуры облучаемых образцов экспериментальные устройства для испытаний материалов в ИР делятся на петлевые и ампульные. [10, 4, 11]

Экспериментальная петля представляет собой отдельный канал в реакторе, снабженный автономным циркуляционным контуром охлаждения с собственными насосами, теплообменниками, аппаратурой для контроля и очистки теплоносителя. В петлях с конкретным теплоносителем обеспечиваются условия, соответствующие параметрам энергетического реактора, для которого испытываются образцы. Тепло от облучаемых образцов в петлевых установках отводится во внешнюю среду через самостоятельные теплообменные устройства. [3, 12, 4, 9]

Ампульные устройства (АУ), как правило, не имеют специальной системы теплоотвода. [10] Тепло от образцов и конструкционных материалов самой ампулы передается непосредственно теплоносителю реактора. Поэтому в них затруднительно

создать температуру ниже теплоносителя ИР. Верхний уровень температур в АУ определяется работоспособностью конструкционных материалов, применяемых для их изготовления. В ампульном устройстве возможно регулирование температуры испытываемых образцов и ее поддержание в заданных пределах. Регулирование температуры может осуществляться благодаря изменению коэффициента теплоотдачи на пути теплового потока от образцов к теплоносителю реактора [4, 9, 13] или с использованием дополнительных электронагревателей. Например, в работе [10] приводится классификация и примеры конструкций ампульных устройств, использовавшихся в реакторе СМ для облучения различных материалов. Рассмотрены варианты АУ без регулирования и с регулированием температуры.

В работе [4] авторами рассматривается такой вариант облучательного устройства, как петли-ампулы. Эта конструкция является промежуточной между петлями и ампулами, в схему которой включен специальный насос (как в петлевой установке). При этом генерируемое в петле-ампуле тепло передается теплоносителю реактора, как это предусмотрено в АУ.

К реакторным испытаниям опытных твэлов предъявляются особые требования, связанные, как с обеспечением безопасности испытаний, так и с контролем за параметрами эксперимента в процессе его проведения, и получением представительных результатов. Твэл (тепловыделяющий элемент) является основным конструкционным элементом активной зоны ядерного реактора, в котором размещается ядерное топливо [14]. Нормальная работа реактора в наибольшей степени определяется работоспособностью твэлов, которые эксплуатируются в сложных и тяжелых условиях (высокие тепловые нагрузки и температуры, большие температурные градиенты, высокие механические напряжения, воздействие излучения на материалы и другие факторы) [12, 15]. Твэлы реакторов различных типов эксплуатируются в условиях воздействия разных видов теплоносителя, а также в различных температурных диапазонах. [12] Сложность процессов, происходящих в твэлах при их облучении, требует проведения всесторонних испытаний в исследовательских реакторах. В процессе испытаний должны, прежде всего, воспроизводиться параметры и состав теплоносителя, тепловые нагрузки и температуры твэлов, характерные для их эксплуатации в энергетическом реакторе. [9]

Реакторные эксперименты по исследованиям свойств материалов и обоснованию работоспособности твэлов необходимо проводить в условиях, максимально приближенным к натурным (то есть к условиям их работы в энергетических реакторах). Об этом, в частности, говорится в работах [4, 12]. Именно такие данные наиболее представительны и должны использоваться для верификации расчетных моделей и программ, описывающих процессы в твэлах, происходящие при их эксплуатации [16]. Обеспечение проведения реакторного эксперимента в контролируемых условиях, а также оснащение экспериментальных устройств и опытных твэлов датчиками (инструментация) для контроля параметров испытаний повышает представительность получаемых данных.

Петлевые и ампульные реакторные испытания имеют каждый свои достоинства и недостатки. Этим обуславливается круг задач, для которого наиболее предпочтительно использование данных облучательных каналов и устройств. Испытания опытных твэлов в петлевых установках исследовательских реакторов является распространенным способом исследований ОТ [11, 12]. Основным преимуществом петлевых установок в данном случае считается возможность облучения твэлов и образцов с большим энерговыделением. Это возможно благодаря интенсивному охлаждению твэлов теплоносителем, циркулирующим в петлевом контуре. В качестве основного недостатка экспериментальных петель выделяют то, что каждая петля предназначена для конкретных испытаний в условиях конкретного теплоносителя (который рассчитан на определенные температуры) и не может быть легко переоборудована для испытаний образцов при других параметрах. [4, 10]

Ампульные устройства также используются для испытаний опытных твэлов и топливных композиций. Возможности по проведению реакторных испытаний опытных твэлов в ампульных устройствах являются важным инструментом на этапе, когда еще не разработано петель с необходимыми параметрами (например, как в случае испытаний твэлов проектируемого в настоящее время реактора ВВЭР-СКД [17]). Также ампульные реакторные испытания эффективны на стадии, когда необходимо проведение экспресс-экспериментов на стадии выбора оптимальной технологии изготовления топливных композиций и оболочечных материалов [18]. Испытания в АУ в данном случае могут позволить отобрать кандидатные материалы для последующих более длительных ресурсных испытаний. Так как ампульные устройства не требуют дополнительного

оборудования (обеспечивающего охлаждение образцов) при их эксплуатации в реакторе, то они имеют меньшую стоимость, по сравнению с петлевыми установками. Благодаря этому АУ можно создавать заново для каждого конкретного эксперимента, что позволяет достичь наиболее оптимальных условий испытаний. [10, 11] В качестве недостатков ампульных испытаний можно отметить ограниченные возможности по отводу тепла при испытаниях образцов с высоким энерговыделением [10], малые скорости теплоносителя (при экспериментах в условиях естественной конвекции), а также то, что в одном АУ можно разместить относительно небольшое количество образцов опытных ТВЭЛов.

Экспериментальное обоснование работоспособности ТВЭЛов создаваемых реакторов и обоснование выбора усовершенствованных конструкций ТВЭЛов уже эксплуатируемых установок является результатом комплекса работ, включающего в себя дореакторные, реакторные и послереакторные исследования. Поэтому при планировании реакторных экспериментов необходимо учитывать, как результаты, полученные на этапе дореакторных стендовых испытаний, так и необходимость получения в процессе облучения образцов достаточного количества материалов для последующих послереакторных исследований.

Несмотря на развитие реакторного материаловедения и на то, что к настоящему времени появились новые методы, материалы, расчетные подходы, применяемые как при подготовке, так и при проведении ампульных реакторных испытаний, использовавшиеся во второй половине 20-го века базовые принципы являются актуальными и сегодня. Совместное использование накопленного в реакторном материаловедении опыта и современных методик и инструментов необходимо при организации и реализации реакторных экспериментов для решения актуальных задач по испытаниям опытных ТВЭЛов инновационных реакторов. Совершенствование существующих способов получения экспериментальных данных, а также техники и методов проведения ампульных реакторных испытаний опытных ТВЭЛов отражены в настоящей работе.

1.2. Основные принципы разработки ампульных устройств для испытаний ОПЫТНЫХ ТВЭЛОВ

Как уже было отмечено, условия эксплуатации ТВЭЛОВ могут значительно различаться в зависимости от типа ЯЭУ. Температуры и тепловые нагрузки на ТВЭЛЫ, которые должны быть достигнуты в каждом эксперименте, а также среда, в которой находятся ТВЭЛЫ при испытаниях, определяют методику их проведения и конструкцию ампульного устройства. [4]

С целью выбора наиболее оптимальной схемы АУ для достижения необходимых параметров, обеспечения безопасности проведения реакторных экспериментов и получения наиболее представительных результатов выполняется анализ возможных вариантов конструкции ампульного устройства с исследуемыми ТВЭЛАМИ. [19]

Чаще всего ампульное устройство состоит из цилиндрической ампулы с боковой поверхностью в виде теплового барьера. [4] Как уже отмечалось, для достижения и регулирования температур в ампульных устройствах используются различные термические сопротивления. В качестве термических сопротивлений, чаще всего, используют зазоры различной величины, которые могут быть заполнены газом, легкоплавким металлом или порошком. Газы являются наиболее удобным наполнителем, так как при их применении возможно легко изменять величину термического сопротивления благодаря изменению величины самого зазора или за счет изменения теплопроводности при замене одного газа другим. [10] В работе [4] отмечается, что при испытаниях АУ в реакторах бассейнового типа, часто используется дополнительный нагрев для создания

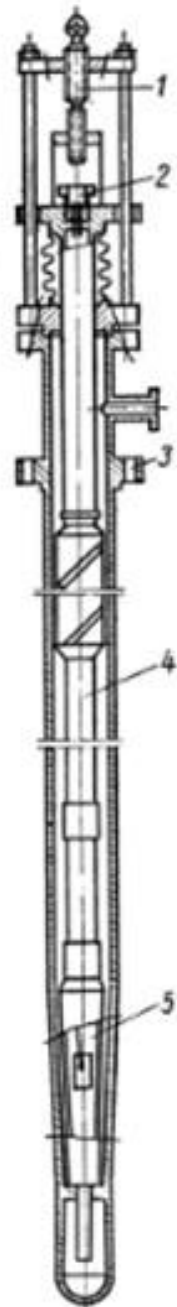


Рисунок 1.4. Пример схемы АУ с переменным газовым зазором, где: 1 – подъемное устройство, 2 – узел герметичного вывода термопар, 3 – корпус канала, 4 – подвеска, 5 – ампула с образцами [10]

необходимой температуры образцов и точности ее поддержания.

Пример схемы ампульного устройства с переменным газовым зазором, использовавшегося на реакторе СМ, приводится на Рисунке 1.4. В данном случае конструкцией АУ предусмотрено, что изменение термического сопротивления достигается за счет возможности изменять величину зазора. [10]

Помимо обеспечения требуемых тепловых условий, при испытаниях опытных твэлов важен выбор необходимых нейтронно-физических характеристик каналов облучения. Для испытаний топливных композиций важен поток тепловых нейтронов, при определении повреждающей дозы в конструкционных материалах оболочки твэлов - поток быстрых нейтронов. В каждой облучательной полости исследовательского реактора присутствуют нейтроны различных энергий. Когда полость находится в пределах активной зоны, энергетический спектр потока нейтронов в полости близок к спектру нейтронов АЗ. Если рассматривается полость в отражателе реактора, то энергетический спектр потока нейтронов в ней делается более «мягким» (т.е. все больше нейтронов обладает малой энергией) по мере удаления от активной зоны. [3, 4] Это необходимо учитывать при планировании реакторных испытаний опытных твэлов и определении позиций для проведения эксперимента. Выбор ячеек для облучения проводится на основании предварительных нейтронно-физических расчетов. Параметры выбранной ячейки в активной зоне или отражателе реактора необходимо принимать во внимание при проектировании ампульного устройства.

Таким образом, для обоснования конструкции ампульного устройства с опытными твэлами необходимо проведение комплекса расчетных обоснований, который включает теплогидравлические, нейтронно-физические, прочностные расчеты, оценки внутритвэльных процессов инструментированных твэлов. В настоящее время подобные расчеты проводятся с использованием специальных программ. В качестве примеров можно привести применение кода ANSYS CFX для расчета теплогидравлических параметров теплоносителя [20], программы MCU-PTR для определения нейтронно-физических характеристик [18, 21], программного комплекса UZOR для проведения прочностных процессов [18, 22]. Программы, которые могут применяться для оценок внутритвэльных процессов в твэлах (в том числе, инструментированных), испытываемых в АУ, будут описаны в Разделе 1.4.

1.3. Примеры реакторных испытаний опытных твэлов и разработки облучательных устройств

Огромный опыт петлевых испытаний опытных твэлов был накоплен в рамках экспериментов, проводившихся на многопетлевом реакторе МР, который эксплуатировался ранее в Москве в Курчатовском институте. Реактор имел петлевые установки с различными теплоносителями. На реакторе МР был выполнен большой объем испытаний опытных твэлов, в числе которых твэлы различного типа для реакторов ВВЭР, РБМК, атомных ледоколов. Также проводились исследования водных и газовых режимов для различных энергетических реакторов. Испытания на реакторе МР, в частности, позволили обосновать работоспособность твэлов и ТВС для разрабатывавшихся во второй половине 20-го века отечественных энергетических реакторов. [6, 8] На МР проводились эксперименты с инструментированными опытными твэлами. Особенно интенсивно испытания инструментированных опытных твэлов реакторов ВВЭР проводились в рамках советско-финской исследовательской программы СОФИТ. Данные, полученные в экспериментах на реакторе МР, включая данные по программе СОФИТ, использовались для верификации разрабатывавшихся расчетных кодов для описания поведения твэлов в процессе облучения. Результаты, полученные в рамках СОФИТ, были переданы в банк данных NEA OECD. [8, 23] В начале 90-х годов реактор МР был остановлен. В настоящее время большой объем испытаний опытных твэлов проводится на петлевом реакторе МИР НИИАР [8, 5].

В качестве примеров зарубежных исследовательских реакторов, на базе которых проводятся или проводились испытания опытных твэлов, можно привести реактор АТН (США) и НВВН в Халдене (Норвегия). [12, 24]

Тяжеловодный кипящий реактор корпусного типа НВВН в Халдене представлял собой базу для исследований опытных твэлов в рамках международного сотрудничества. Международный проект Халден являлся одним из ведущих центров по исследованиям поведения топлива и материалов легководных реакторов. Он был образован в 1958 году представителями 11 стран. Позднее к нему присоединились другие участники. Россия была членом данного проекта с 1995 года. Эксперименты в НВВН проводились, как в каналах с теплогидравлическими условиями охлаждения реактора, так и в петлевых установках. [24, 25] В частности, на реакторе НВВН были

проведены эксперименты по исследованию топлива ВВЭР и PWR с использованием инструментированных твэлов. В процессе испытаний применялись датчики, измеряющие температуру топливного сердечника, его перемещение, удлинение оболочек, а также давление под оболочками твэлов. Целью экспериментов на реакторе HBWR было, в частности, изучение влияния структурно технологических параметров на поведение топлива ВВЭР по сравнению с типовым топливом PWR. В результате испытаний были получены данные для верификации расчетных кодов, моделирующих процессы в твэлах. [24, 26, 8, 25] Реактор в Халдене был остановлен в 2018 году [27].

Как было отмечено в предыдущем Разделе, ампульные реакторные испытания занимают свою нишу в проведении исследований топливных композиций и опытных твэлов с различным обогащением.

Примеры результатов внутриреакторных испытаний теплофизических свойств твэлов с использованием ампульных устройств, опубликованных в 1970-х годах в работах зарубежных исследователей, приводятся в работе [28]. Схемы конструкций ампульных устройств для облучения твэлов, использовавшихся в исследовательских реакторах НИИАР, приводятся в работах [10, 4] (Рисунок 1.4).

В работе [29] рассмотрен пример разработки ампульного устройства и результаты проведения реакторного эксперимента по облучению нитридного топлива. Целью испытаний в реакторе ИВВ-2 было получение данных о характеристиках распухания и кинетике выхода ГПД из топлива в зависимости от различных параметров. Испытываемая ампула была оснащена двумя термопарами. Схема конструкции включала газовые коммуникации, которые обеспечивали заполнение твэла и регулирующего температуру зазора транспортным газом. Для периодического отбора проб образовавшихся при облучении ГПД осуществлялась продувка твэла. [29]

Проектирование и расчетные обоснования ампульного устройства и петлевой установки для реактора МИР НИИАР, которые рассматриваются в качестве возможных вариантов для проведения в будущем испытаний опытных твэлов разрабатываемого реактора ВВЭР-СКД, показаны в работе в [17]. Так как для создания экспериментальной петли с СКД-параметрами требуются дополнительные площади, а также значительные ресурсные и временные затраты, то при отсутствии в настоящее время таких петлевых установок ампульные испытания становятся основным источником информации о поведении опытных твэлов под облучением. [17]

Опыт проведения ампульных реакторных испытаний на реакторе ИР-8 будет рассмотрен в Разделе 1.6.

1.4. Моделирование параметров твэлов в процессе эксплуатации

В настоящее время в России и в других странах существует большое количество расчетных кодов, моделирующих процессы, происходящие под облучением в твэлах реакторов различных типов.

Расчетные обоснования являются важным этапом разработки конструкции новых твэлов. Полученные в рамках реакторных испытаний данные используются для верификации расчетных моделей и уточнения предварительных решений о конструкции твэлов. В рамках комплекса расчетных обоснований в данном случае происходит оценка тепловых, прочностных и других характеристик твэла, а также моделирование их изменений в процессе эксплуатации. [12, 14] Существует большое количество, как отечественных, так и зарубежных, программ и расчетных кодов, используемых для оценок различных характеристик твэлов и моделирования процессов, происходящих в них под облучением. Примерами расчетных кодов для моделирования параметров твэлов легководных реакторов из числа отечественных программ являются СТАРТ, РАПТА (АО «ВНИИНМ»), из числа зарубежных – TRANSURANUS (Германия), FRAPCON, BISON (США) и многие другие. [30, 31, 32]

В процессе облучения в твэлах происходит большое количество взаимосвязанных процессов. Разработка расчетных кодов, позволяющих моделировать состояние топлива и оболочки в зависимости от параметров эксплуатации твэлов, необходима для выбора их конструкции, материалов и обоснования режимов работы [14].

Программы для расчетов внутритвэльных процессов постоянно совершенствуются. Среди актуальных для расчетов твэлов реакторов типа ВВЭР сегодня стоят такие задачи, как адаптация существующих расчетных твэльных кодов для моделирования процессов в толерантных твэлах [31, 33] и в твэлах проектируемых установок ВВЭР-СКД. Сложность данных задач связана, в частности, с тем, что как для разрабатываемых твэлов толерантного типа, так и для твэлов создаваемых инновационных ВВЭР, существует либо ограниченное количество или совсем отсутствуют данные реакторных испытаний твэлов. Эта ситуация пока не позволяет провести полноценную

верификацию разрабатываемых расчетных кодов и, за неимением другого, заставляет использовать данные кросс-верификационных оценок, полученных с использованием различных программ.

В рамках обоснования возможности реализации топливных экспериментов на реакторе ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт», наряду с необходимостью проведения нейтронно-физических, теплофизических, прочностных расчётов для опытных твэлов и АУ, существует необходимость моделирования различных процессов в твэлах в процессе их облучения (в частности, проведение оценок распределения температур и внутреннего давления в твэлах, параметров зазора и оболочки, выхода газообразных продуктов деления и других). [16]

Для контроля параметров эксперимента при реакторных испытаниях опытных твэлов возможно использование твэлов с закрепленными на его оболочке термопарами (инструментированные твэлы). При обосновании реакторного эксперимента и выборе конструкции инструментированного твэла необходимо проведение оценок динамики внутритвэльных процессов. Одним из основных параметров в данном случае является распределение температуры в твэле, и предполагается, что его предварительные оценки должны быть сделаны в первую очередь. Как отмечается в [14], температура и ее градиенты оказывают существенное влияние на отводимые от твэла тепловые потоки, физические свойства материалов, термические напряжения, деформации в них и другие параметры. Таким образом, важно иметь расчётные оценки для температуры топлива инструментированных термопарами твэлов. Данные оценки могут быть выполнены с использованием твэльных кодов и специальных программ.

1.5. Реактор ИР-8 для проведения экспериментов с опытными твэлами

Исследовательский реактор ИР-8 ведет свою историю с 1957 года, когда был сооружен первый в СССР реактор ИРТ. Проводившиеся впоследствии его модернизации с применением ТВС нового типа привели к созданию модернизированного реактора ИРТ-М. Опыт эксплуатации и разработанные новые физические подходы позволили создать на его базе в 1981 году новый реактор ИР-8, обладающий уникальными экспериментальными возможностями. [34, 35]

Технические характеристики реактора ИР-8 определяют технику и методику проведения исследований опытных твэлов и топливных композиций. ИР-8 - это исследовательский реактор бассейнового типа, максимальной мощностью 8 МВт. Активная зона и отражатель в корпусе размещаются в бассейне глубиной 11 м. Активная зона реактора ИР-8 состоит из 16-ти ТВС ИРТ-3М с твэлами трубчатого типа квадратного сечения. Отражатель - металлический бериллий. [34]

Как отмечается в [7], благодаря особенностям компоновки активной зоны в реакторе ИР-8 обеспечиваются наилучшие «среднепоточные» нейтронные параметры для реакторов такого класса, как в активной зоне, так и в отражателе. Максимальные плотности потоков нейтронов в реакторе ИР-8 приблизительно равны [36]:

- в активной зоне
 - тепловых, н/(см²·с) _____ $1,6 \cdot 10^{14}$
 - быстрых ($E \geq 0,5$ МэВ), н/(см²·с) _____ $1,1 \cdot 10^{14}$
- в отражателе
 - тепловых, н/(см²·с) _____ $2,0 \cdot 10^{14}$
 - быстрых ($E \geq 0,5$ МэВ), н/(см²·с) _____ $4,8 \cdot 10^{13}$

В Таблице 1.1 представлены параметры теплоносителя реактора ИР-8.

Таблица 1.1. Параметры теплоносителя

Параметр	Значение
Расход теплоносителя через реактор, л/с	208
Скорость теплоносителя в зазорах ТВС (средняя), м/с	2,4
Давление теплоносителя на входе в активную зону, МПа	0,186
Перепад давления на активной зоне, МПа	0,216
Температура теплоносителя на входе в активную зону, °С	до 50
Подогрев теплоносителя в реакторе, °С	6,9

Общий вид активной зоны и отражателя, а также горизонтальные экспериментальные каналы (ГЭК) реактора ИР-8 показаны на Рисунке 1.5.

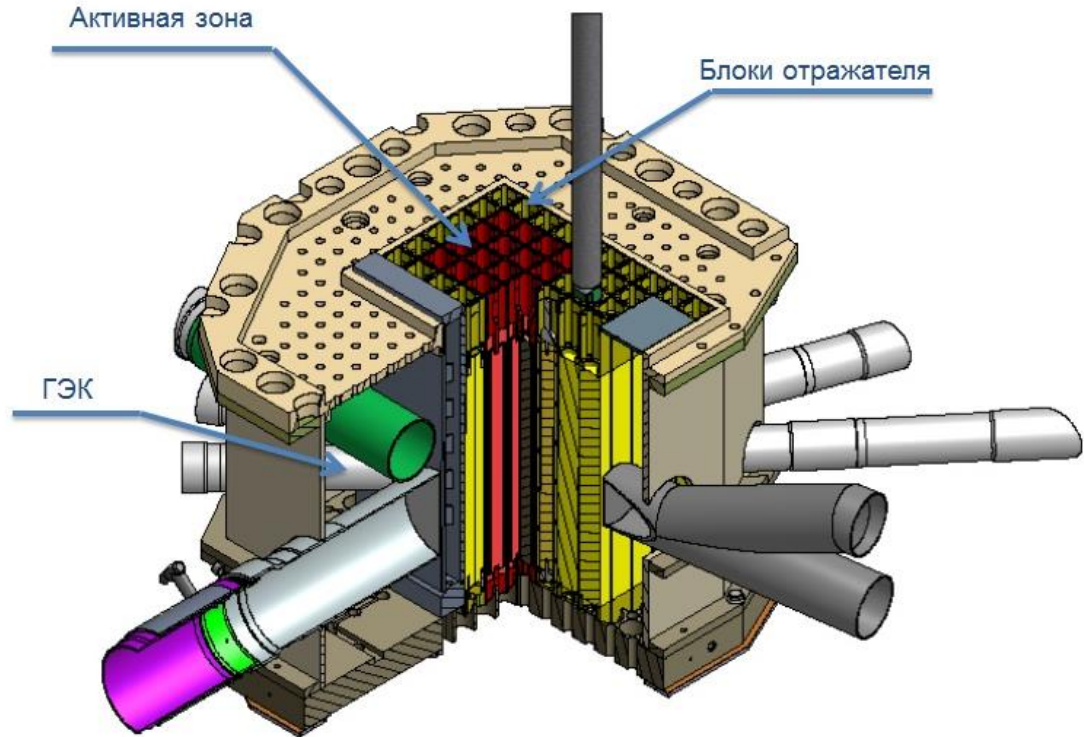


Рисунок 1.5 – Общий вид активной зоны и отражателя реактора ИР-8 [37]

ГЭК используются для вывода пучков нейтронов в экспериментальный зал за пределы биологической защиты реактора. На каждом ГЭК смонтировано специальное экспериментальное оборудование для проведения соответствующих исследований.[7]

Испытания опытных твэлов проводятся на вертикальных экспериментальных каналах (ВЭК) в активной зоне и отражателе реактора ИР-8. Для испытаний могут использоваться до 4 каналов-ампул (которые установлены в угловые ТВС) и до 8 каналов в сменных бериллиевых блоках [7, 34].

Более подробно активная зона и отражатель реактора ИР-8 показаны на Рисунке 1.6 [36].

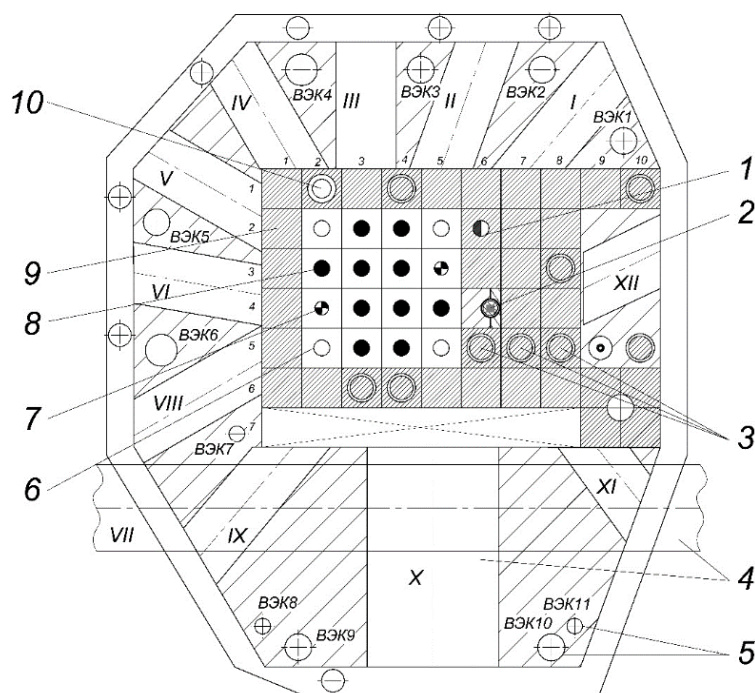


Рисунок 1.6 – Поперечное сечение реактора с показанным в качестве примера АУ в отражателе, где 1, 3, 9, 10 – сменный бериллиевый блок со стержнем автоматического регулятора, с бериллиевой пробкой, сплошной, с ампульным устройством соответственно; 2 – защитный блок-экран из вольфрама с АУ; 4 – горизонтальный экспериментальный канал; 5 – вертикальный экспериментальный канал; 6 – четырёхтрубная ТВС с экспериментальным каналом; 7,8 – шеститрубная ТВС со стержнем аварийной защиты и стержнем компенсации реактивности соответственно

Особенностью реактора ИР-8 является возможность проведения исследований опытных твэлов (в том числе экспресс-экспериментов) в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации реакторов типа ВВЭР: по тепловой нагрузке, температуре оболочки и топлива твэлов, а также по давлению охлаждающего ОТ теплоносителя. Проведение таких испытаний опытных твэлов является особенно важным на этапе разработки оптимальной технологии изготовления топливных композиций и выбора кандидатных материалов оболочек твэлов проектируемых реакторов [18, 34]. Близкие к «натурным» условия испытаний могут быть обеспечены в ИР-8 благодаря геометрическим особенностям активной зоны и ТВС реактора, а также подбору необходимых нейтронно-физических параметров.

Важно также отметить, что при подборе необходимых параметров облучения возможно обеспечить в ИР-8 соотношение плотности потока тепловых нейтронов к быстрым, близкое к соотношениям в реакторах ВВЭР. Эта особенность может

позволить комплексно получать в ходе экспериментов темпы выгорания ядерного топлива и набора флюенса быстрых нейтронов на оболочке опытных твэлов, соответствующих таковым при эксплуатации твэлов в реакторе ВВЭР-1000. Именно такие экспериментальные данные являются наиболее представительными и могут быть использованы для совершенствования имеющихся расчётных моделей и валидации существующих и разрабатываемых кодов, описывающих поведение твэлов в процессе эксплуатации [16]. Получение таких данных является особенно важным при испытаниях новых материалов, для которых еще не накоплен опыт облучения в составе твэлов, а также при испытаниях уже известных материалов, которые планируется эксплуатировать в новых условиях.

В вертикальных каналах реактора ИР-8 возможно получать необходимые экспериментальные данные о поведении опытных твэлов под облучением с использованием ампульных устройств (преимущества применения которых описаны в Разделе 1.1 настоящей работы). Охлаждение опытных твэлов в АУ происходит в условиях естественной конвекции теплоносителя. Для каждого отдельного эксперимента необходима разработка ампульного устройства конкретной конструкции, выбор способа инструментации опытных твэлов и самой ампулы, с учетом условий проведения испытаний.

Решение задач, связанных с испытаниями опытных твэлов, в НИЦ «Курчатовский институт» особенно эффективно ввиду наличия на одной площадке реактора ИР-8 и комплекса материаловедческих защитных камер для проведения послереакторных исследований [7, 18].

1.6. Опыт по проведению исследований опытных твэлов и топливных композиций на реакторе ИР-8

На базе реактора ИР-8 накоплен опыт испытаний опытных твэлов с различными топливными композициями (в частности, с диоксидом урана, с UZr и $\text{ThO}_2\text{-UO}_2$ топливом, с расплавносолевой топливной композицией). [18, 8, 34]

Проведением облучения опытных твэлов (2002 - 2009 годы) с топливными композициями $\text{ThO}_2\text{-UO}_2$ и UZr была обоснована принципиальная возможность реализации в реакторе ИР-8 испытаний опытных твэлов в условиях, приближенных к условиям эксплуатации реакторов типа ВВЭР. Схема применявшегося АУ показана на Рисунке 1.7. Актуальность проводившихся исследований была связана с рассмотрением возможности использования топливной композиции $\text{ThO}_2\text{-UO}_2$ в качестве «бланкета», а UZr композиции в качестве «запала» в легководном тепловом реакторе-бридере (ВВЭРТ), учитывая необходимость получения экспериментальных данных по этим композициям. [18, 34]

С 2002 по 2009 годы (с перерывами) на реакторе ИР-8 проводились испытания опытных твэлов с топливной композицией $\text{ThO}_2\text{-UO}_2$ в двух ампульных

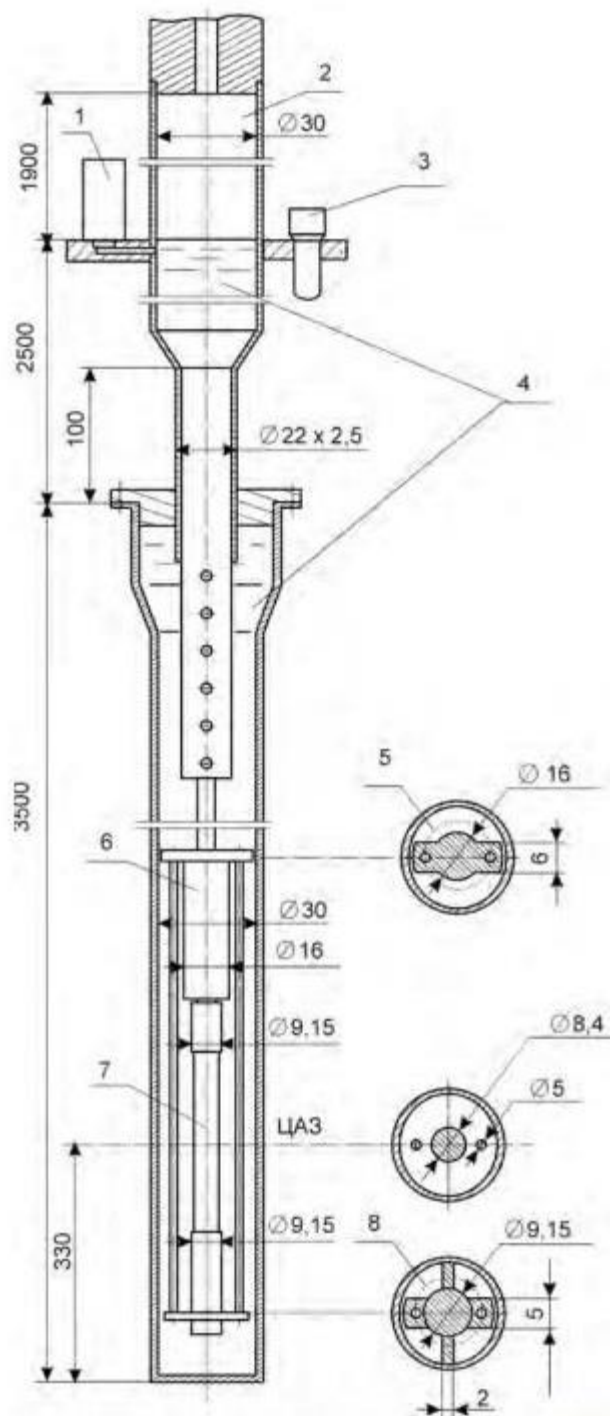


Рисунок 1.7. Схема АУ с опытными твэлами с топливной композицией $\text{ThO}_2\text{-UO}_2$, где 1 – датчик давления, 2 – газовый объем, 3 – датчик активности воды, 4 – вода, 5 – верхняя решетка, 6 – датчик удлинения, 7 – опытный твэл, 8 – нижняя решетка [(18), (34)]

устройствах:

- 7 979 эфф. часов до удельного выгорания топлива ~ 14 МВт·сут/кг ТМ;
- 7 614 эфф. часов до удельного выгорания топлива ~ 13 МВт·сут/кг ТМ.

Опытные твэлы облучались в специально разработанном АУ, где их охлаждение проводилось водяным теплоносителем в условиях естественной конвекции. Ампула была инструментирована датчиками, которые позволяли измерять такие параметры, как температура, давление теплоносителя и плотность потока тепловых нейтронов. [18]

Опытные твэлы с топливной композицией $\text{ThO}_2\text{-UO}_2$ в АУ облучались в ИР-8 при следующих параметрах, близких к параметрам реакторов ВВЭР [18]:

- температура оболочек твэлов сплава Э-110 - 350...360 °С;
- максимальный линейный тепловой поток - 250 Вт/см;
- максимальные потоки тепловых и быстрых нейтронов $\sim 10^{14}$ н/(см² · с);
- давление охлаждающей опытные твэлы воды - 16 МПа.

Опытные твэлы с уран-циркониевой топливной композицией также облучались в рамках уже описанной выше исследовательской программы. Реакторные испытания в данном случае проводились при условиях, аналогичных условиям облучения твэлов с $\text{ThO}_2\text{-UO}_2$, но при повышенной линейной тепловой нагрузке (330 Вт/см). [18, 34]

Таким образом, при проведении описанных выше экспериментов была, в частности, показана возможность испытаний опытных твэлов с различными топливными композициями. Рассмотренный выше опыт ампульных испытаний твэлов в реакторе ИР-8 обосновывает возможность проведения таких исследований в условиях, приближенных к натурным.

1.7. Примеры актуальных задач исследований опытных твэлов для перспективных ВВЭР, проведение которых возможно на реакторе ИР-8

1.7.1. Общие положения

Как уже отмечалось, разработка инновационных установок ВВЭР-СКД и совершенствование действующих реакторов за счет создания твэлов толерантного типа входят в число направлений развития реакторов типа ВВЭР. Важной задачей также является совершенствование используемых выгорающих поглотителей.

Испытания опытных твэлов в поддержку данных направлений могут быть проведены на реакторе ИР-8 с использованием ампульных устройств в условиях, приближенных к натурным. Обзор ряда задач, стоящих перед разработчиками перспективных ВВЭР, а также выполненные предварительные оценки возможности их реализации на реакторе ИР-8 представлены в настоящем Разделе.

1.7.2. Исследования опытных твэлов при параметрах эксплуатации реакторов ВВЭР

1.7.2.1. Обзор актуальных задач по совершенствованию выгорающих поглотителей и при разработке твэлов толерантного типа

В легководных энергетических реакторах наибольшее распространение нашли выгорающие поглотители на основе оксида гадолиния (Gd_2O_3), так называемые, твэги. Топливные таблетки в твэгах изготовлены из уран-гадолиниевого топлива. [38] Использование выгорающих поглотителей дает возможность увеличить обогащение, повысить глубину выгорания топлива реакторов ВВЭР и перейти к топливным циклам большей длительности. [39]

Опыт эксплуатации уран-гадолиниевого топлива показывает, что твэги имеют отличия в своем термомеханическом поведении от штатных твэлов. В частности, в начальный период эксплуатации имеет место большее удлинение твэгов, чем твэлов с диоксидом урана. Данные вопросы, возникающие при эксплуатации уран-гадолиниевого топлива, а также особенности его поведения в процессе облучения подробно описаны в

работах [39, 40]. Оптимизация технологии изготовления уран-гадолиниевого топлива рассмотрена в работе [41].

При этом продолжается совершенствование выгорающих поглотителей легководных реакторов. В частности, в работе [42] рассматривается возможность использования перспективных выгорающих поглотителей на основе комбинации оксида гадолиния и оксида эрбия. Таким образом, несмотря на имеющийся опыт изучения и эксплуатации топлива ТВЭГов, дальнейшие его исследования являются актуальными в настоящее время. Такие испытания могут быть проведены на реакторе ИР-8 в условиях, приближенных к условиям эксплуатации ВВЭР. Испытываемые образцы ТВЭГов и ампульное устройство могут быть инструментированы датчиками для получения необходимых экспериментальных данных в режиме реального времени. Проведения таких реакторных испытаний топлива перспективных ТВЭГов позволит получить необходимые данные для верификации соответствующих моделей и расчетных кодов, описывающих поведение ТВЭГов в процессе эксплуатации.

Еще одной актуальной задачей для развития легководных атомных энергетических установок в настоящее время является разработка так называемого толерантного топлива (ТВЭЛов толерантного типа, Accident Tolerant Fuel, ATF). Цель создания толерантного топлива – повысить безопасность реактора при постулированных проектных и запроектных авариях. При этом должны быть сохранены основные эксплуатационные параметры ЯЭУ [33, 43].

Внимание к работам по созданию устойчивого к авариям ядерного топлива существенно возросло после аварии на АЭС «Фукусима-1» (Япония). Появился сам термин «толерантное топливо», под которым подразумевается топливо, устойчивое к проектным и запроектным авариям, в том числе, с возникновением пароциркониевой реакции. Работы по совершенствованию топлива в данных направлениях ведутся как в России, так и в других странах [44, 33].

Переход на новое топливо для реакторов типа ВВЭР-1000 потребует существенных затрат ресурсов (финансовых, временных, перестройки существующей автоматизированной технологии изготовления ТВЭЛов и ТВС), а также масштабного комплекса исследовательских работ. Конкуренция на мировом рынке обуславливает для российских производителей необходимость обоснования безопасности и эффективности разрабатываемых АЭС на уровне мировых стандартов [43]. Предполагается, что при

внедрении топлива толерантного типа, наряду с повышением безопасности эксплуатации АЭС, будут иметь место и положительные экономические эффекты. [45]

Исследования по разработке толерантного топлива в России включают совершенствование, как оболочек твэлов, так и композиций топливного сердечника. Работы по созданию ATF в других странах ведутся в рамках аналогичных направлений. [33, 44]

Первый рассматриваемый вариант – нанесение жаростойкого покрытия на оболочки твэлов. Такое покрытие исключает контакт циркония с теплоносителем и способствует уменьшению количества выделяемого водорода. В качестве одного из основных вариантов предлагаются покрытия на основе хрома [46].

Второе рассматриваемое решение – использование нового материала оболочки твэла. Основное преимущество – полное исключение циркония из активной зоны. Рассматриваются различные варианты кандидатных материалов. [47, 44]

Один из предлагаемых кандидатных материалов оболочки твэлов толерантного типа – сплав 42ХНМ. В числе его преимуществ выделяют отсутствие пароводяной реакции в аварийных условиях, высокую коррозионную и радиационную стойкость при облучении, высокие прочностные и пластические характеристики. В нашей стране накоплен большой опыт эксплуатации сплава 42ХНМ в качестве материала оболочек твэлов атомных ледоколов и транспортных реакторов, поглощающих элементов системы управления и защиты реакторов ВВЭР. [47, 48]

В ряде как отечественных [49], так и зарубежных исследований [32] в качестве материала оболочки твэлов толерантного типа вместо циркониевых сплавов рассматривается использование сплавов FeCrAl.

Использование FeCrAl позволяет избежать разгерметизации оболочки на ранней стадии аварии при температурах 650 – 800 °С, поскольку сплавы FeCrAl имеют более высокий предел прочности. Также они менее подвержены коррозии за счет образования оксидных пленок с алюминием и хромом. Основными недостатками замены циркониевых сплавов на FeCrAl является существенное увеличение стоимости ТВС и повышение уровня обогащения топлива [50].

Отечественные исследования свойств образцов из сплавов Fe-Cr-Al-Si в рамках дореакторных испытаний рассматриваются, в частности, в статье [49]. Представляется,

что продолжением таких работ могут стать реакторные испытания оболочек из данного материала в составе опытных ТВЭЛОВ толерантного типа.

При проектировании ТВЭЛОВ толерантного типа нужно учитывать, что для сталей характерно значительно большее сечение поглощения тепловых нейтронов, чем для сплавов циркония. [14, 47] Поэтому при использовании сталей в качестве оболочки ТВЭЛОВ реакторов на тепловых нейтронах требуется либо более высокое обогащение топлива, либо уменьшение толщины оболочки. С точки зрения организации и проведения реакторных испытаний важным является то, что утонение оболочки осложняет инструментацию опытных ТВЭЛОВ термopарами.

Еще один возможный вариант замены оболочки толерантных ТВЭЛОВ предусматривает использование композитных материалов (например, SiC). [47, 33]

Третье направление развития ATF-топлива связано с изменением топливной матрицы. Рассматриваются варианты замены традиционного диоксида урана на топливо с улучшенными теплофизическими характеристиками, в числе которых, уран-молибденовое топливо, дисилицид и нитрид урана. [51]

В настоящее время испытания вариантов опытных ТВЭЛОВ толерантного типа проводятся в реакторе МИР АО «ГНЦ НИИАР». Испытываются ТВЭЛЫ с различными топливными композициями (UO_2 , UMo и U_3Si_2) и с оболочками из сплава 42ХНМ и из сплава Э110 с нанесенным хромовым покрытием. [46, 52, 53] При этом поиск и разработка материалов ТВЭЛОВ толерантного типа в настоящее время продолжаются.

В исследовательском реакторе ИР-8 возможно проведение испытаний опытных ТВЭЛОВ толерантного типа в условиях, приближенных к условиям их эксплуатации в ВВЭР. Характеристики ИР-8 предполагают, что с использованием исследовательской базы реактора, в частности, могут быть проведены экспресс-эксперименты по испытаниям вариантов топлива и кандидатных материалы оболочек ТВЭЛОВ толерантного типа на начальных этапах их облучения. Как уже отмечалось, особенно важны такие испытания в случае материалов или их новых модификаций, для которых еще не накоплен опыт облучения в составе ТВЭЛОВ. В связи с этим, реализация задач по испытаниям опытных ТВЭЛОВ толерантного типа на реакторе ИР-8 является актуальной для дальнейшего совершенствования реакторов типа ВВЭР.

1.7.2.2. Примеры разработки конструкции ампульного устройства для облучения опытных твэлов на реакторе ИР-8 при параметрах ВВЭР

Для подготовки проведения на реакторе ИР-8 облучений твэлов с уран-гадолиниевым топливом, а также твэлов толерантного типа проводились обоснования, включающие как расчеты, так и выбор конструкции АУ.

Как уже отмечалось, проектирование ампульного устройства тесно связано с постановкой задачи эксперимента. Конструкция АУ для облучения, как твэгов, так и опытных толерантных твэлов, должна позволять достигать в процессе испытаний необходимых значений давления охлаждающего теплоносителя и температуры оболочек ОТ. Выбранная конструкция ампульного устройства должна также обеспечивать и надлежащий запас до наступления кризиса теплообмена, который, как известно, является одним из важнейших параметров для испытаний твэлов при их охлаждении в режиме естественной конвекции.

Поэтому при разработке АУ определяющее значение имеют значения тепловых нагрузок на испытываемый образец, а также размеры ампулы, обусловленные параметрами канала в выбранной для облучения ячейке активной зоны или отражателя реактора. Выбор позиции облучения в исследовательском реакторе (ячейки) осуществляется на основании нейтронно-физических расчётов, которые призваны обосновать достижение необходимых уровней энерговыделения в опытных твэлах. [16]

Комплексом расчетов была обоснована возможность проведения в реакторе ИР-8 ампульных испытаний твэлов с уран-гадолиниевым топливом в условиях, приближенных к условиям эксплуатации реакторов типа ВВЭР. Была разработана конструкция АУ для облучения твэгов (Рисунок

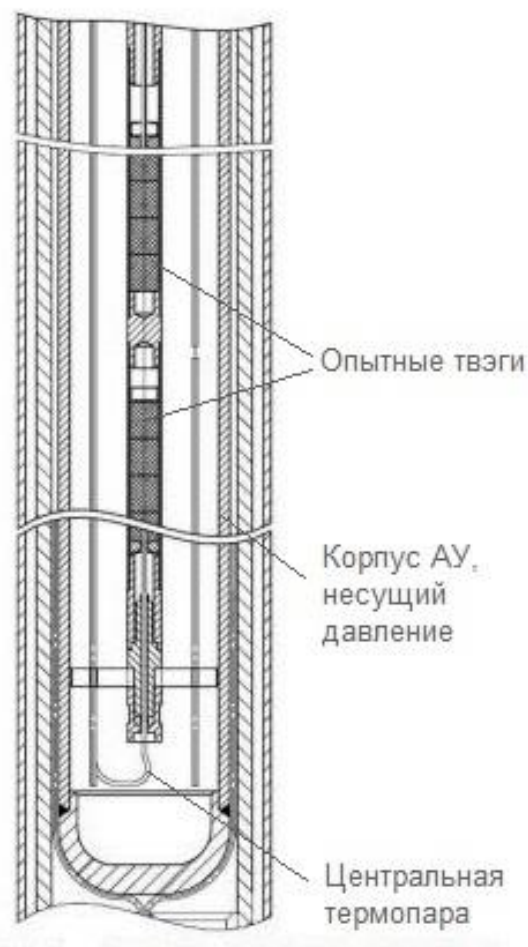


Рисунок 1.8. Схема АУ с уран-гадолиниевым топливом [18]

1.8). Основные результаты обоснований приведены в работе [18]. Схема конструкции подразумевает наличие в ампуле межтрубного зазора, заполненного газом (например, гелий или азот). Результаты проводившихся теплогидравлических расчетов показывают, что в таком ампульном устройстве возможно проводить испытания двух опытных ТВЭгов с тепловой нагрузкой ~ 220 Вт/см. [18]

Для исследований опытных ТВЭлов толерантного типа проводилась разработка прототипа АУ, которая была основана на конструкции ампульных устройств, уже использовавшихся при аналогичных испытаниях ОТ в реакторе ИР-8. В данном случае рассматривался вариант ампульного устройства для облучения опытных ТВЭлов с топливом U-Mo и оболочкой из сплава 42ХНМ, которые являются одними из возможных кандидатных материалов для толерантных ТВЭлов. На основе проведенного анализа вариантов конструкции было выбрано экспериментальное ампульное устройство с одной стенкой, размещаемое в 4-х трубной ТВС реактора ИР-8. Предполагалось, что в АУ может испытываться один или несколько опытных ТВЭлов. Пример принципиальной схемы конструкции ампульного устройства представлен на Рисунке 1.9. [43, 37]

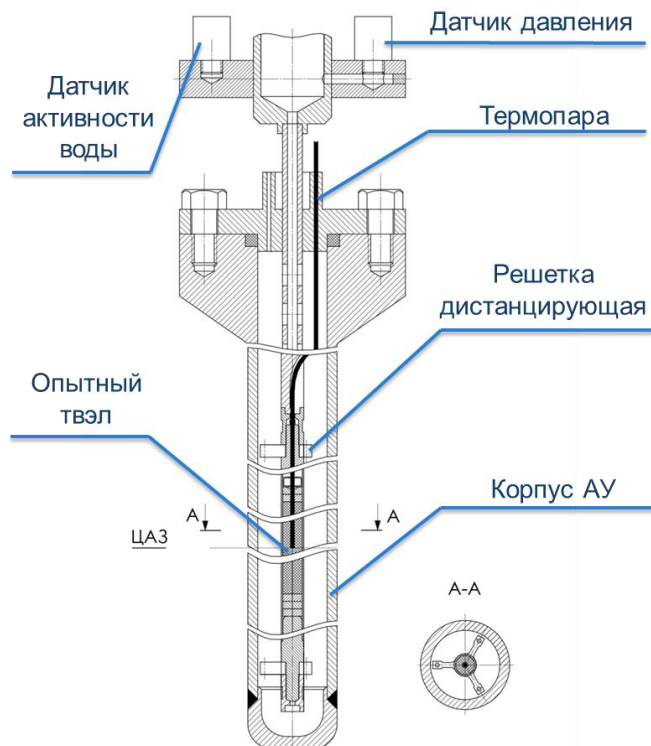


Рисунок 1.9. Схема конструкции ампульного устройства для облучения опытных АТФ-ТВЭлов в реакторе ИР-8

В рамках предварительных теплофизических расчётов для обоснования экспериментов с толерантными твэлами на реакторе ИР-8 для выбранного варианта АУ оценивались ограничения по допустимым линейным нагрузкам. В рамках нейтронно-физических расчётов проводились оценки скорости выгорания, мощности образцов твэлов для выбранных вариантов кандидатных материалов топливных композиций и материалов оболочки. На основании проведенных расчетов была обоснована возможность проведения испытаний опытных твэлов толерантного типа на реакторе ИР-8 в условиях, приближенных к условиям эксплуатации в реакторах ВВЭР.

Информация о динамике температуры опытных твэлов толерантного типа может быть получена при помощи термопар, закреплённых на оболочке ОТ или в центре топливной таблетки. Как уже отмечалось, среди рассматриваемых кандидатных материалов оболочки ATF-твэлов, есть варианты, когда предлагаемый сплав имеет большее, чем сплавы циркония, значение сечения поглощения тепловых нейтронов. В таком случае, предполагается, что оболочка твэла будет иметь меньшую толщину, чем в традиционном твэле реактора ВВЭР. Это обуславливает то, что для толерантных твэлов существует своя специфика выбора способа инструментации термопарами. Выбор оптимального способа инструментации опытного твэла для проведения ампульного реакторного эксперимента в данном случае представляет собой особенно сложную задачу, учитывая относительно малую толщину оболочки и возможные радиальные размеры чувствительного элемента термопары.

Поэтому перед проведением длительных ресурсных испытаний опытных твэлов толерантного типа важна реализация относительно краткосрочного макетного реакторного эксперимента. В случае невозможности инструментации опытного твэла при проведении основных ресурсных испытаний, вопрос о получении прямых данных о температуре оболочки может быть также решён в рамках макетного эксперимента. В дальнейшем полученная информация должна быть использована для верификации расчётов выбранной конструкции АУ с опытными твэлами. Одним из вариантов решения задачи по инструментации оболочки опытного макетного ATF-твэла может быть заделка термопары в утолщённую оболочку ОТ. Предполагается утолщение оболочки вовнутрь при сохранении ее внешнего диаметра. [16] Аналогичный подход рассматривается также при планировании проведения на ИР-8 экспериментов с твэлами проектируемых реакторов ВВЭР-СКД. Особенности исследований СКД-твэлов описаны

в Разделе 1.7.3. Для инструментированных твэлов должны проводиться дополнительные расчеты (в частности, оценки влияния инструментации на распределение температур в твэле). Алгоритм проведения таких оценок будет рассмотрен в Главе 5 настоящей работы.

1.7.3. Исследования опытных твэлов при СКД-параметрах

1.7.3.1. Выбор материалов оболочек твэлов и параметров водно-химического режима при проектировании ВВЭР-СКД

Концепции ядерных реакторов, где вода сверхкритического давления использовалась в качестве теплоносителя, рассматривались с 50-60 годов прошлого века, но активное развитие они получили в начале 2000-х годов [54]. Разработка водоохлаждаемых реакторов со сверхкритическими параметрами теплоносителя рассматривается сегодня в России в качестве одного из перспективных направлений развития реакторов типа ВВЭР [2]. Возможность использования теплоносителя за критических параметров прорабатывалась в разные годы в таких отечественных организациях, как НИЦ «Курчатовский институт», АО «НИКИЭТ», АО ОКБ «Гидропресс», АО «ГНЦ-ФЭИ». Концепция реактора типа ВВЭР-СКД в качестве одной из перспективных разрабатывается по программе МАГАТЭ в разных странах мира. Такие работы ведутся в Европе, а также в США, Канаде, Японии, Китае и других государствах. [55, 56]

Как в России, так и за рубежом, разрабатываются различные концептуальные проекты ВВЭР-СКД, отличающиеся, в частности, конструкцией реактора, спектром нейтронов, параметрами теплоносителя и схемами его циркуляции в активной зоне. В числе проектов рассматриваются одноконтурные и двухконтурные схемы ЯЭУ. [54, 57] Существует большое количество предложений, как по вариантам конструкции, так и по возможным материалам твэлов [54, 58].

В основу концепций реакторов ВВЭР-СКД положено стремление объединить успехи, достигнутые в области технологии корпусных реакторов с легководным теплоносителем, и перехода к достаточно жесткому спектру нейтронов благодаря уменьшению плотности теплоносителя, повышению давления до сверхкритического и увеличению доли топлива в активной зоне [59, 54]. Одним из важных преимуществ

перехода к реакторам ВВЭР-СКД по сравнению с действующими установками, в частности, является значительное увеличение коэффициента полезного действия ЯЭУ [57]

Несмотря на то, что в тепловой энергетике накоплен большой опыт использования воды при сверхкритических (25 – 30 МПа) и суперсверхкритических (30 – 37 МПа) параметрах, опыт по ее использованию в качестве теплоносителя ЯЭУ отсутствует. Для решения данной задачи требуется выполнение комплекса работ, который включает обоснование нейтронно-физических и теплогидравлических параметров разрабатываемого реактора ВВЭР-СКД, материаловедческие исследования, а также выбор оптимального водно-химического режима. [55]

Как отмечается в статье [60], с 60-х годов прошлого века в рамках различных вне реакторных испытаний проводилось большое количество работ по исследованию теплоотдачи различных веществ при сверхкритическом давлении. В работе [55] приведен обзор экспериментальных исследований теплообмена к воде при сверхкритическом давлении в трубах. Вне реакторные исследования в среде СКД-теплоносителя продолжаются и в настоящее время. Так в ЦНИИ КМ «Прометей» создан стенд, на котором были проведены испытания образцов в автоклаве с водной средой со сверхкритическими параметрами, имитирующей легководный теплоноситель реактора ВВЭР-СКД. [61] Однако, экспериментальные исследования в условиях конвекции теплоносителя являются гораздо представительнее автоклавных. В развитие этого направления проводятся исследования параметров водного СКД-теплоносителя при естественной конвекции. В НИЦ «Курчатовский институт» изготовлен и в 2022 году прошел тестовые испытания замкнутый контур с естественной циркуляцией легководного теплоносителя при сверхкритическом давлении. [60]

Результаты, полученные в рамках дореакторных исследований, безусловно, необходимо использовать при подготовке реакторных экспериментов в обоснование выбора материалов ТВЭЛов разрабатываемых ВВЭР-СКД. При этом только в рамках реакторных испытаний возможно создать условия, учитывающие, как влияние облучения на кандидатные материалы ТВЭЛов, так и воздействие теплоносителя, который при облучении подвергается радиолизу. Несмотря на существующие возможности проведения стендовых испытаний образцов, данные реакторных экспериментов по исследованию кандидатных материалов ТВЭЛов в среде теплоносителя

с СКД-параметрами в доступной литературе отсутствуют [62]. Поэтому в настоящее время существует необходимость в получении экспериментальных данных реакторных исследований опытных твэлов в условиях воздействия теплоносителя с СКД-параметрами для проведения дальнейших разработок по развитию данного перспективного типа реакторов.

При планировании ампульных реакторных испытаний опытных твэлов в среде СКД-теплоносителя нужно учитывать его особенности. При переходе через критическую точку (давление ~ 22 МПа, температура ~ 374 °С) свойства воды резко изменяются. В условиях СКД происходит значительная перестройка структуры воды, в частности, существенным образом меняется её плотность, граница между жидкостью и газом стирается, вода пребывает в гомогенном состоянии. Примеры изменения свойств воды приведены на Рисунке 1.10 [54]. Сложность и особенности учета теплоотдачи к теплоносителю с СКД-параметрами отмечается, в частности, в работах [60, 63]. Данные особенности повышают неопределенности при подготовке сложного реакторного эксперимента и требуют проведения дополнительных обоснований, чему посвящена Глава 3 настоящей работы.

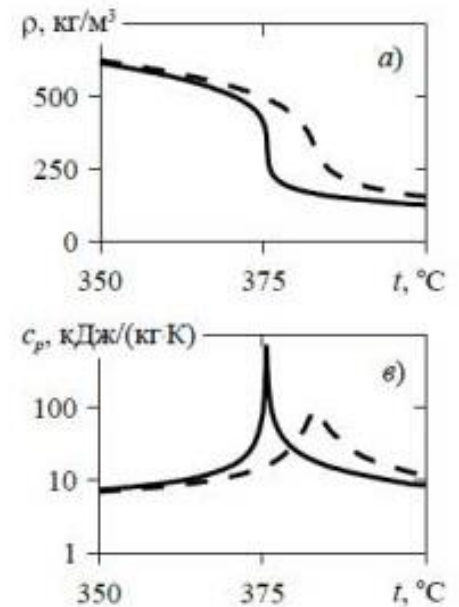


Рисунок 1.10 - Пример изменения свойств воды: изменения плотности (а) и теплоемкости (в) [54]

Выбор материала оболочки твэлов является одной из важнейших задач при разработке реакторов ВВЭР-СКД. В связи с этим возникает необходимость поиска или разработки конструкционных материалов, отвечающих критериям надежности при эксплуатации в новых условиях. Эти разработки должны сопровождаться комплексом различных экспериментов, включая реакторные и послереакторные исследования.

Опыт тепловых станций, работающих при СКД-параметрах, свидетельствует о том, что водяной теплоноситель в данном случае является довольно агрессивной средой. Поэтому предполагается, что твэлы проектируемых реакторов ВВЭР-СКД будут эксплуатироваться в достаточно «жестких» условиях. Так оболочки твэлов будут

эксплуатироваться не только при высоких температурах и высоком внешнем давлении, но и в условиях воздействия весьма агрессивного теплоносителя. Поэтому выбор оболочечного материала твэла приобретает особое значение при создании реакторной установки. Особую роль в процессе поиска конструкционных материалов играет проведение экспериментов, реализуемых в условиях, максимально близких к тем, в которых планируется эксплуатировать проектируемые реакторные установки. [19]

Хромоникелевые стали аустенитного класса, в частности, сталь марки ЧС-68, рассматриваются в качестве кандидатных материалов оболочки твэлов в отечественных проектах реакторов ВВЭР-СКД с различным спектром нейтронов. [54, 62] Для ЧС-68 накоплен опыт эксплуатации в качестве оболочек твэлов энергетических реакторов на быстрых нейтронах в среде жидкометаллического теплоносителя, изучалось изменение ее свойств под облучением [64]. В числе преимуществ данной стали можно отметить, что она обладает достаточно хорошими прочностными характеристиками, отличается радиационной стойкостью. При этом недостатком являются сравнительно низкий коэффициент теплопроводности и высокое значение температурного коэффициента линейного расширения. [54] Таким образом, для изучения коррозионной стойкости стали ЧС-68 под воздействием водяного теплоносителя с СКД-параметрами необходимо проведение дополнительных исследований.

Как отмечается в работе [65], коррозионное воздействие на конструкционные материалы в активной зоне разрабатываемого реактора ВВЭР-СКД будет значительно отличаться от таковой в реакторах, эксплуатируемых в настоящее время. Поэтому в результате экспериментальных исследований необходимо установить характер и масштабы коррозионного воздействия СКД-теплоносителя на конструкционные материалы [65].

Для получения представительных данных коррозионных испытаний материалов в среде теплоносителя с СКД-параметрами важно обеспечить его конвекцию, а также приближенность материалов конструктивных элементов экспериментального циркуляционного контура к материалам проектируемой реакторной установки.

Как отмечают авторы [65], коррозия материалов в неизотермическом контуре зависит от обменных процессов с теплоносителем на горячей и на холодной стороне циркуляционного контура. К каждому локальному участку контура теплоноситель

становится термодинамически неравновесным. В связи с этим результаты, полученные в изотермических условиях автоклавов, по мнению авторов [65], будут некорректны. Коррозионные испытания конструкционных материалов должны проводиться в неизотермических условиях, при которых возможно получение удовлетворительных данных о коррозионной стойкости КМ и масштабах массопереноса в циркуляционном контуре [65].

На то, что внереакторные автоклавные испытания при исследовании коррозии оболочек твэлов являются мало представительными, указывают и авторы [4]. Говоря об использовании ядерного перегрева пара в ЯЭУ с повышенной эффективностью, авторы [4] отмечают, что работоспособность оболочек твэлов в значительной степени будет определяться их коррозионной стойкостью в условиях высоких температур в среде перегретого водяного пара.

Как отмечают авторы [65], перенос примесей теплоносителем является наиболее опасным видом коррозионного разрушения для конструкционных материалов, присутствующих в циркуляционном контуре. Принудительная циркуляция в неизотермическом контуре теплоносителя с СКД-параметрами обуславливает то, что продукты коррозии выносятся на одних участках контура, а на других происходит их отложение [65]. Также в работе [65], со ссылками на литературные данные, приводятся примеры, когда скорость коррозии материала, испытанного в неизотермической циркуляционной установке, превышает на порядок данные коррозионных испытаний, полученных в автоклаве.

Требования к неизотермичности циркуляционного контура необходимо учитывать при организации ампульных реакторных испытаний кандидатных материалов оболочек твэлов в среде СКД-теплоносителя.

На результаты реакторных экспериментов по исследованию коррозионной стойкости оболочек опытных твэлов также будет оказывать влияние водно-химический режим СКД-теплоносителя в ампульном устройстве. Так как условия проведения реакторных исследований, как уже отмечалось, должны быть максимально приближены к натурным, то параметры водно-химического режима в АУ также должны быть максимально приближены к ВХР проектируемой установки ВВЭР-СКД. При этом анализ литературы [66] показывает, что, несмотря на наличие выработанных рекомендаций и теоретических обоснований, базирующихся на опыте тепловой

энергетики и работе реакторов с перегревом пара, выбор оптимальных параметров водно-химического режима разрабатываемого ВВЭР-СКД требует дополнительных экспериментальных подтверждений. Реакторные исследования вариантов водно-химического режима для ВВЭР-СКД, согласно доступным литературным данным, пока не проводились.

По мнению авторов [54], основные задачи организации водно-химического режима реактора с СКД-теплоносителем включают: подавление радиолиза воды; уменьшение коррозии конструкционных материалов на всех участках пароводяного тракта; предотвращение отложений на поверхностях основного и вспомогательного оборудования, соприкасающихся с рабочей средой; обеспечение возможно меньшей активации воды за счет находящихся в ней примесей.

Специфика применения воды околокритических параметров в ядерных реакторах обусловлена воздействием радиационного излучения на теплоноситель и возникающего радиолиза воды. Это имеет место, в частности, в реакторах типа ВВЭР и РМБК [67]. По мнению авторов [67, 54], требуются экспериментальные исследования данного явления в конкретном спектре нейтронов, включая массоперенос продуктов коррозии и радионуклидов. Необходимо получение расчетно-теоретических и экспериментальных результатов по радиационной физикохимии воды для условий, максимально приближенных к условиям работы разрабатываемых инновационных реакторов [54].

В настоящее время практически нет данных, в которых рассматривались бы вопросы, связанные с явлением радиолиза водного теплоносителя при СКД-параметрах под действием ионизирующего излучения с образованием в итоге водорода, кислорода и пероксида водорода.

В [54] также отмечается, что проблемой, требующей решения, является радиационная физикохимия внутриконтурных процессов в области давлений и температур, при которых планируется эксплуатировать реакторы с СКД-теплоносителем. Не изучены пока механизмы радиолиза и коррозии конструкционных материалов, учитывая продукты разложения теплоносителя при сильном изменении физико-химических свойств воды около критической точки. Плотность воды по длине циркуляционного контура значительно изменяется, что может существенно повлиять на выход продуктов радиолиза. Изменение свойств воды, в

частности, может также повлиять на процессы отложения и переноса в контуре естественных примесей и коррозионных продуктов. [54]

Несмотря на то, что моделирование радиоллиза теплоносителя для реакторов типа ВВЭР хорошо проработано (некоторые примеры приведены в работах [68, 69]), актуальным является вопрос разработки и верификации моделей радиоллиза воды с СКД-параметрами.

Учитывая, что особенности ВХР при СКД в котлах на ТЭС хорошо отработаны [67], многими авторами отмечается, что для создания реакторов ВВЭР-СКД важен опыт тепловой энергетики по применению конструкционных материалов и ВХР теплоносителя [70, 71, 72].

Таким образом, на сегодняшний день на стадии разработки концепций проектов ЯЭУ вопросы организации ВХР реакторов с СКД-теплоносителем решаются с учетом опыта эксплуатации водоохлаждаемых не кипящих и кипящих реакторов, а также рекомендаций, разработанных для обычных паровых котлов сверхкритических параметров. [54] Освоенные в тепловой энергетике ВХР представляют практический интерес и рекомендуются для использования при создании ВВЭР-СКД. [70]

В настоящее время для проектируемых реакторов ВВЭР-СКД рекомендуется нейтральный водно-химический режим. [70, 66] Подробный обзор данных по выбору параметров водно-химического режима проектируемых установок ВВЭР-СКД, с учетом накопленного опыта, и существующие предложения представлены в статье [66].

Таким образом, предложенный в настоящей работе вариант АУ с внутриампульной конвекционной петлей может использоваться, как для испытаний кандидатных материалов оболочек твэлов, так и для получения данных о радиоллизе, а также уточнения оптимальных параметров водно-химического режима проектируемого ВВЭР-СКД. Разработка такого варианта ампульного устройства представлена в Разделе 3.2.

1.7.3.2. Пример разработки конструкции ампульного устройства для облучения опытных ТВЭЛов проектируемого ВВЭР-СКД на реакторе ИР-8

Одним из направлений создания отечественных проектов рассматривается разработка энергетического реактора ВВЭР-СКД с быстрым спектром нейтронов. Для обоснования выбора конструкционных материалов оболочек и обоснования работоспособности ТВЭЛов для энергетического реактора ВВЭР-СКД и многоцелевого тестового легководного СКД-реактора малой мощности [59] с быстрым спектром нейтронов была разработана двухэтапная экспериментальная программа, включающая в себя, в частности, последовательные облучения образцов оболочечных КМ и опытных ТВЭЛов в реакторах АО «ГНЦ НИИАР» и НИЦ «Курчатовский институт» [73, 62, 19]. Двухэтапная методика проведения реакторных испытаний предусматривала то, что вначале опытные ТВЭЛы должны облучаться в быстром реакторе до заданного уровня повреждающей дозы, а затем дополнительно - в тепловых исследовательских реакторах в среде теплоносителя со сверхкритическими параметрами. [62]

Для проведения облучений опытных ТВЭЛов в реакторе ИР-8 было разработано специальное ампульное устройство (АУ-СКД), проектирование которого рассмотрено в работе [19]. Предложенная конструкция АУ-СКД предусматривала, что при проведении испытаний должны быть обеспечены следующие условия: давление ~ 30 МПа; температура оболочки опытного ТВЭЛа ~ 550 °С. Внешний диаметр оболочки образца испытываемого ТВЭЛа - 8,4 мм, толщина оболочки - 0,8 мм. В качестве одного из кандидатных материалов оболочки ТВЭЛа рассматривается сталь ЧС-68-ИД хд. и другие материалы [62]. Для решения поставленных экспериментальных задач важно обеспечить естественную конвекцию СКД-теплоносителя в рабочем объеме АУ с достижением максимально возможных скоростей его движения в заданных условиях.

Для облучения опытных твэлов было рассмотрено однотрубное АУ-СКД с одним опытным (вверху) и одним подогревающим твэлом (внизу), расположенными друг над другом, охлаждаемыми теплоносителем в режиме естественной конвекции (Рисунок 1.11). Под опытным в данном случае понимается исследуемый твэл (предварительно облученный в реакторе БОР-60 АО «ГНЦ НИИАР»), под подогревающим – необлученный твэл, используемый для достижения необходимых параметров в ампульном устройстве [73]. Центр сцепления опытного и подогревающего твэлов в АУ-СКД должен располагаться по высоте на уровне физического центра активной зоны реактора ИР-8. Согласно проводившимся оценкам, для достижения требуемых температур на оболочках мощность подогревающего твэла должна быть меньше мощности верхнего.

При монтаже ампульного устройства в лабораторных условиях АУ-СКД должно заполняться водой с заданными водно- и газо-химическими параметрами. Между водой и фланцем создаётся газовый объём, заполненный инертным газом. Этот объём в определённой степени является в данной конструкции компенсатором давления («холодный» компенсатор объема) при изменении объёма теплоносителя в зависимости от температуры.

Рассматривалось облучение АУ-СКД в одной из ячеек отражателя реактора ИР-8. Выбор наиболее оптимальной ячейки осуществляется на основании нейтронно-физических расчетов [74].

Согласно результатам выполненных оценок температур оболочек твэлов, для опытного образца наблюдается довольно сильная неравномерность по высоте. Однако, следует отметить, что, достижение как можно большей высотной равномерности температуры оболочек является важным с точки зрения представительности результатов испытаний и получения достаточного количества материалов для последующих послереакторных исследований. [19]

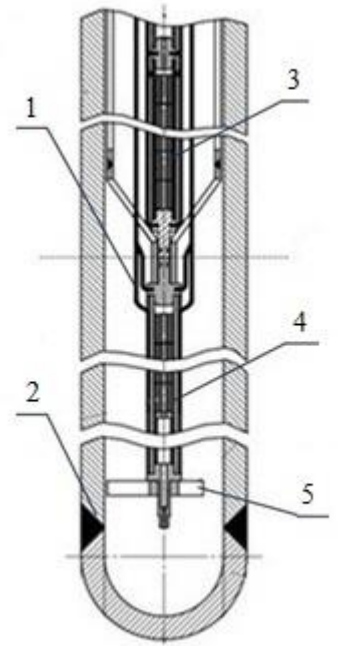


Рисунок 1.11.
Принципиальная схема АУ-СКД для облучения опытных твэлов:
1 – термопара, 2- корпус АУ, несущий давление;
3 – опытный твэл,
4 – подогревающий твэл,
5 – дистанцирующая решетка

На основании проведенного комплекса расчетов (нейтронно-физические [74], теплогидравлические расчеты) была обоснована принципиальная возможность достижения необходимых параметров реакторного эксперимента по испытаниям рассмотренного варианта АУ-СКД. При этом было определено, что некоторые вопросы требуют отдельно проработанных решений, а части предложенной конструкции требуют проведения дополнительных расчетов и отработки ряда технологий в рамках стендовых испытаний.

Как уже отмечалось, резкое изменение теплофизических свойств воды вблизи критической точки [54], обуславливает (на ряду с другими факторами) требования к точности измерений температуры и давления в АУ-СКД, а также контролю оболочки твэлов во время реакторного эксперимента. Также нужно учитывать, что при данной схеме конструкции АУ СКД-параметры теплоносителя и необходимые температуры оболочки опытного твэла достигаются, главным образом, за счет энерговыделения в верхнем твэле (то есть регулирование параметров в процессе испытаний возможно только изменением мощности реактора).

Таким образом, при использовании данного варианта АУ-СКД существуют аспекты, ограничивающие возможности по получению представительных экспериментальных данных и проведению реакторного эксперимента в регулируемых и контролируемых условиях. Поэтому необходима дополнительная проработка вопросов, связанных с:

- Необходимостью проведения реакторного эксперимента с АУ-СКД в регулируемых и контролируемых условиях;
- Достижению большей равномерности температур оболочки опытного твэла по высоте.

Для решения вопроса о проведении эксперимента с данным вариантом конструкции ампульного устройства в контролируемых условиях предлагается проведение макетного реакторного эксперимента с инструментированными твэлами для получения прямых данных о температуре оболочки, а также инструментация твэлов и самого АУ-СКД. Для достижения большей высотной равномерности температур оболочки испытываемого образца твэла при проведении испытаний в регулируемых и контролируемых условиях было выделено второе направление проектирования по разработке АУ-СКД оптимизированной конструкции. Для упрощения классификации примем в качестве

условного названия для конструкции АУ-СКД, рассмотренной в данном Разделе - АУ-СКД-1, а для доработанной схемы с использованием внутриампульной конвекционной петли – АУ-СКД-2 (Раздел 3.2).

Подробнее вопросы оптимизации конструкций ампульных устройств для получения более представительных данных реакторных испытаний опытных твэлов будут рассмотрены в Разделе 3 настоящей работы.

1.8. Способы инструментации твэлов для контроля температуры

1.8.1. Общие положения

При подготовке реакторного эксперимента важно выбирать наиболее оптимальные способы инструментации, как облучательных устройств, так и объектов контроля. Важнейшую роль при реакторных испытаниях опытных твэлов играет получение корректных экспериментальных данных о температуре оболочки и топлива.

Реализация способа заделки термопар для обеспечения точности и надежности измерений температуры опытных твэлов в специфических условиях конкретного реакторного эксперимента представляет собой задачу, требующую отдельно проработанных решений. Требования к инерционности используемых термопар определяются исходя из параметров изучаемых нестационарных процессов. Это особенно важно при необходимости определения во время реакторного эксперимента возможного начала кризиса теплообмена, когда исследования проводятся в замкнутом объеме специального ампульного устройства. Обеспечение качества и выбор способа заделки термопар становится отдельной задачей, учитывая соотношения толщин оболочек твэлов и возможных диаметров ТП. Также надлежащее качество заделки необходимо для обеспечения надежности и требуемой точности измерений в процессе эксперимента при воздействии внешних факторов, таких, как реакторное излучение, температура, давление, взаимодействие со средой теплоносителя.

Для комплексной оценки большого количества факторов, которые необходимо учитывать при выборе оптимального способа инструментации опытных твэлов в процессе планирования сложного реакторного эксперимента, необходимо наличие

гибких методик оценки качества заделки термопар, определения их инерционности и погрешности измерений.

В рамках работ по поиску оптимального способа инструментации твэлов, которые планируется облучать в АУ на реакторе ИР-8, был проведен анализ имеющихся литературных данных и актуальных публикаций по теме. Результаты выполненного анализа приведены в Разделе 1.8.

1.8.2. Опыт термометрирования твэлов в реакторных экспериментах

Методы измерения температуры, применяемые в ядерных реакторах, достаточно разнообразны и широко описаны в технической литературе. [75, 12, 76]

К датчикам измерения температуры в реакторе предъявляется целый ряд требований. Общие требования заключаются в том, что материалы, из которых изготавливаются термодатчики, должны обладать удовлетворительными ядерно-физическими (минимальное сечение поглощения нейтронов, минимальная наведенная активность при облучении) и теплофизическими свойствами (высокий коэффициент теплопроводности, низкая теплоемкость, малый температурный коэффициент объемного расширения и другие). Датчики должны, в частности, обладать высокой жаропрочностью, механическими свойствами, обеспечивающими работоспособность датчика при высоких температурах, высокой радиационной и коррозионной стойкостью. Ресурс работы датчиков должен превышать или быть равен ресурсу работы термометрируемого объекта (например, твэла) или должна обеспечиваться возможность замены датчика. [75]

Термопары (термоэлектрические преобразователи) получили наиболее широкое распространение в реакторной технике. Их используют, как для контроля температуры теплоносителя, так и температуры твэлов (оболочки и топлива), и в разнообразных реакторных экспериментах. [12, 77]

Для среднего диапазона температур (до 900 °С, кратковременно до 1300 °С) наиболее распространенными являются термопары с электродами хромель-алюмель (ХА), для высоких температур (до 2200 °С) – с вольфрам-рениевыми термоэлектродами [75, 12, 76]. Поэтому для контроля температуры оболочки твэлов, испытываемых в АУ на реакторе ИР-8, были выбраны термопары типа ХА.

Оболочка твэлов в зависимости от их конструкции может иметь различную толщину. Как отмечают авторы [(12)], в случае малой толщины оболочки используемые термопары должны также иметь небольшие размеры. Это в частности, нужно для того, чтобы избежать существенных нарушений теплоотдачи от твэла, а также искажений поля температур в оболочке и возникающих из-за этого погрешностей определения температуры. При этом термопары должны сохранять достаточную механическую прочность. Известно, что диаметр используемых ТП может изменяться в диапазоне от 0,1 до 1,0 мм. При этом профиль концевой части термопары может быть различным. [12]

Авторы [75] отмечают, что при получении данных о температуре твэла на точность и инерционность проводимых измерений оказывает влияние способ заделки рабочего спая термопары на поверхности объекта исследования. Выбранный способ заделки должен обеспечивать плотное прижатие рабочего спая к поверхности и прочное крепление ТП к твэлу. При этом условия теплообмена не должны существенно меняться в месте расположения рабочего спая. [75]

В литературе описаны многочисленные способы заделки термопар, используемых для измерения температуры поверхности твэла. Эти способы могут быть разделены на три основные группы [75, 12]: заделка ТП в дистанционирующее ребро; крепление ТП без углубления в оболочку; заделка ТП с углублением в оболочку. На Рисунке 1.12 [75] показаны способы установки термопар для измерения температуры оболочки твэлов.

При контроле температуры твэлов отдельно выделяют задачу по измерению температуры оболочки твэла и топливного сердечника.

Обеспечение корректности измерений температуры топливного сердечка в процессе работы твэла представляет собой отдельную и достаточно сложную задачу. Основные возникающие при этом сложности связаны с герметизацией выводов термопар, необходимостью обеспечения плотного теплового контакта между ТП и сердечником твэла, расположением ТП в конкретной точке сердечника (так как из-за больших градиентов температуры в топливе даже небольшие смещения ТП от точки замера могут привести к большим погрешностям), необходимостью обеспечения минимального вытеснения топлива термопарой для того, чтобы избежать существенных нарушений температурного поля, и другие. Способ установки термопары внутри твэла,

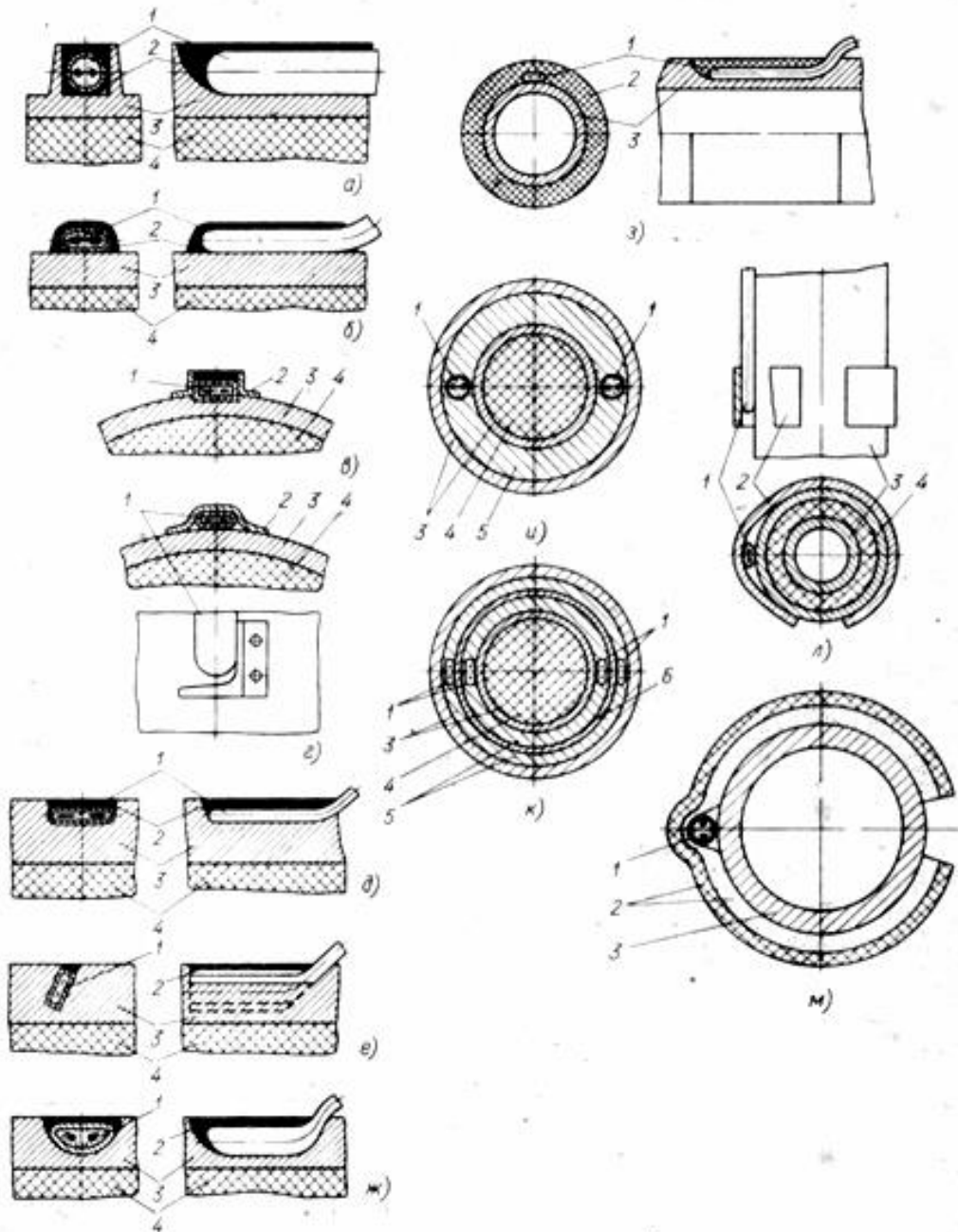


Рисунок 1.12. Примеры заделки ТП на оболочке ТВЭЛов, где:
 а – в дистанционирующее ребро; б – нанесением слоя металла; в – в искусственное ребро; г – приваркой кармана; д – в прямой паз; е – в косой паз; ж – в полукруглый паз; з – в кольцевой паз; и – в термометрический ТВЭЛ РБМК с двумя оболочками; к – в термотеплометрический ТВЭЛ РБМК с элементов термического сопротивления; л – с помощью пружинного кольца; м – с помощью биметаллического кольца; 1 – ТЭП; 2 – крепление; 3 – оболочка; 4 – топливо; 5 – силумин; 6 – элемент термического сопротивления [75]

методы герметизации, выводы ТП существенно зависят от конструкции и материалов, из которых изготовлен твэл. [12]

1.8.3. Факторы, влияющие на точность измерений температуры твэлов

Погрешности измерения температуры термопарами включают, как обычные, так и специфические, которые возникают только в реакторных условиях [75, 12].

Важность оценки методических погрешностей ТП отмечается в [76]. Составляющими погрешности измерения температуры являются погрешности термокомплекта (которая характеризует отличие температуры чувствительного элемента от показаний прибора) и методическая погрешность. Методическая погрешность определяется отличием неискаженной температуры в точке контроля от температуры чувствительного элемента, а также от искажения температурного поля объекта, которое вносится термометрическим устройством [76]. Это отмечают и авторы [75]. Важно учитывать то, что установка термопары в твэле вызывает искажения температурных полей твэла и датчика в том месте, где расположен чувствительный элемент ТП. В связи с этим оценка методических погрешностей связана с рассмотрением температурных полей твэлов и системы «датчик - твэл». [75] Авторы [76] также отмечают, что методические погрешности могут быть значительными, поэтому необходимо проводить их анализ, который обычно состоит в исследовании температурных полей системы «чувствительный элемент – объект контроля».

Например, в [76] приводятся данные, что при измерении температуры поверхности твэла в некоторых случаях отличие температуры рабочего спая ТП от температуры поверхности твэла может достигать 40 - 50 °С, и это нужно учитывать как методическую погрешность. [76]

Авторы [12] выделяют следующие погрешности измерений при помощи термопар. Во-первых, это собственная погрешность, которая обусловлена степенью чистоты материалов термоэлектродов, способом установки ТП на объекте контроля, распределением температуры по измерительному спаю и термоэлектродам и другие. Собственные погрешности стандартных термопар изучены достаточно хорошо и в рабочих интервалах температуры имеют небольшие значения. Во-вторых, при использовании ТП в ядерном реакторе возникают погрешности, которые вызваны

реакторным излучением. [12]

Эффекты, возникающие в термопарах под воздействием излучения, и их влияние на точность показаний ТП изучаются достаточно давно [78]. В результате исследований, проводившихся, как в нашей стране, так и за рубежом, было выяснено, что при облучении в реакторе в термопарах возникают, как мгновенные, так и интегральные эффекты в ЭДС. [78, 77, 79]

Мгновенные (временные) эффекты выражаются в изменении показаний термопар в большую или меньшую сторону при их помещении в поле реакторного излучения. При исчезновении излучения показания возвращаются к исходным значениям. Интегральный (кумулятивный, длительный) эффект увеличивается по мере облучения и сохраняется после прекращения облучения. И мгновенный, и интегральный эффекты наблюдаются при постоянстве температуры. [75, 12] Возможность влияния данных эффектов на показания ТП надо учитывать при планировании испытаний инструментированных образцов на реакторе ИР-8 (нужно принимать во внимание величину плотности потока тепловых нейтронов, а также длительность экспериментов).

В работе [80] отмечается, что в облучательных устройствах часто применяют электронагреватели, создающие электромагнитные помехи, которые могут вносить искажения в показания преобразователя температуры. Это также необходимо учитывать при оценке точности измерений.

Важным при измерении температуры твэлов является учет значения тепловой инерции термопар. Тепловая инерционность – свойство любого контактного датчика температуры [81]. При измерении нестационарных температур термопара не успевает мгновенно следить за изменяющейся температурой среды.

В общем случае инерционность термопары определяется: инерционностью самой термопары (конструкцией, размерами и геометрией рабочего спая, свойствами материалов термоэлектродов) и интенсивностью теплообмена спая со средой [82].

Как отмечают авторы [83], показатель тепловой инерции системы «термопреобразователь – объект контроля», который характеризует теплообмен (качество теплового контакта) между чувствительным элементом и измеряемым объектом, входит во все расчетные формулы температурных погрешностей реакторной термометрии.

В работе [80] отмечается, что требования к инерционности во время реакторных

экспериментов предъявляются только при изучении нестационарных процессов. Как правило, от преобразователей температуры не требуется быстроедействие выше, чем обеспечиваемое постоянной времени, равной 0,1 с [80].

При проведении экспериментов инерция термопары, закрепленной на объекте контроля, может определяться с использованием нестационарного метода регулярного теплового режима, использование которого показано в Главе 4 настоящей работы. Величина инерции является в данном случае обратной к показателю темпа регулярного режима.

Вопросы моделирования процессов в термопарах при проведении реакторных исследований (расчеты температурного поля, значений инерции ТП, оценка погрешностей измерений) рассмотрены в целом ряде работ. Примеры моделей для расчета погрешностей измерений при помощи термопар описаны, в частности, в работах [84, 85, 86].

1.9. Постановка задачи работы

Современные направления развития реакторов ВВЭР ставят новые задачи по проведению реакторных испытаний опытных твэлов.

На основе анализа литературных источников, приведенного в Главе 1, представляется актуальным расширение возможностей по испытаниям твэлов для перспективных ЯЭУ на базе отечественных исследовательских реакторов и, в частности, на реакторе ИР-8.

Среди задач, актуальных для реализации на реакторе ИР-8, можно выделить два направления:

- Исследования оболочек твэлов для проектируемого реактора ВВЭР-СКД, которые будут эксплуатироваться в новых условиях;
- Исследования новых видов твэлов (например, толерантного типа) в условиях параметров ВВЭР.

При этом в результате реакторных испытаний необходимо обеспечить получение представительных экспериментальных данных с достаточным объемом материала для проведения послереакторных исследований.

Отдельное внимание следует уделить методикам измерения температуры оболочек опытных твэлов в реакторных экспериментах, так как инструментация твэла может вносить существенное искажение в поле распределения температур, оказывать влияние на теплогидравлические параметры теплоносителя в АУ или быть трудно реализуемой в связи с использованием более тонких оболочек твэлов (по сравнению с твэлами действующих ВВЭР).

В связи с этим, важным является развитие существующих и разработка новых методов внутрореакторного контроля при испытаниях опытных твэлов, а также повышение точности измерений. Необходимо также совершенствование расчетных моделей и соответствующих программ для проведения оценок параметров реакторных испытаний твэлов и анализа данных уже реализованных экспериментов.

Таким образом, актуальным является обоснование проведения на реакторе ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт» представительных ампульных испытаний опытных твэлов для инновационных ВВЭР в широком диапазоне параметров, включая сверхкритические параметры водяного теплоносителя. Разработка необходимых

расчетных обоснований и методик для проведения таких испытаний на реакторе ИР-8 представлены в настоящей работе.

Схема основных блоков обоснования представительности экспериментов с опытными твэлами в реакторе ИР-8 показана на Рисунке 1.13. Вопросы, рассматриваемые в настоящей работе, выделены на схеме красным.



Рисунок 1.13. Схема обоснования представительности экспериментов с опытными твэлами в реакторе ИР-8

Обобщая материалы, представленные в Главе 1, для разработки и обеспечения представительности реакторных испытаний опытных твэлов для перспективных ЯЭУ в реакторе ИР-8 необходимо решить 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 инструментации, 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.

2. Методы исследования

2.1. Использование регуляторов для повышения управляемости ампульного реакторного эксперимента

Для того чтобы вывести определенную физическую величину на заданное значение и поддерживать ее на определенном уровне возможно использование электронных регуляторов. [87] Одним из типов регулятора, который широко применяется в различных областях науки и техники, является ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор). [87, 88]

Регулятор представляет собой программный модуль, который отвечает за достижение измеряемой величиной заданного уровня (называемого уставкой) и за дальнейшее поддержание величины на этом уровне.

Использование регуляторов возможно для обеспечения выхода на режим и поддержания параметров ампульного устройства на конкретном заданном уровне в процессе эксперимента. Регулирование нагревателем температуры теплоносителя на участке циркуляционного контура АУ-СКД, которое предполагается использовать в реакторе ИР-8 для облучения имитаторов твэлов, планируется осуществлять при помощи ПИД-регулятора. Модель регулятора, который предполагается использовать в АУ-СКД,



Рисунок 2.1 - ПИД-регулятор ТРМ251

представлена на Рисунке 2.1. [19, 89, 90] Данный тип регулятора уже использовался в ампульных экспериментах по облучению КМ, проводившихся на реакторе ИР-8.

При использовании регулятора в АУ-СКД он сравнивает измеренное (при помощи термопары) значение температуры с уставкой и вырабатывает выходной сигнал, направленный на уменьшение их рассогласования. Выходной сигнал регулятора поступает на выходной элемент, с помощью которого осуществляется управление нагревателем [90]. Использование ПИД-регулятора в планируемых на реакторе ИР-8

облучательных экспериментах с имитаторами твэлов учитывалось при проведении теплогидравлических расчетов для АУ-СКД-2.

2.2. Нестационарный метод регулярного режима для получения верификационных данных по энерговыделению в образцах

Одним из важнейших параметров, который необходимо контролировать во время испытаний, является тепловая нагрузка твэла. Знание величины энерговыделения в твэлах также необходимо для проведения корректных теплогидравлических расчетов. Разработка методик внутриреакторного контроля за тепловым состоянием твэлов имеет большое значение. Для определения величины энерговыделения могут использоваться как стационарные, так и нестационарные методы. [91, 92, 14]

В настоящей работе рассматривается возможность применения нестационарного метода регулярного теплового режима для определения величины энерговыделения в имитаторах твэлов и в опытных твэлах при их испытаниях на реакторе ИР-8. Важность разработки методов теплофизического исследования твэлов в переходных режимах (нестационарные методы) отмечается, в частности, в работе [14].

Исследования и теоретическая разработка метода регулярного режима проводились Г.М. Кондратьевым [93, 94]. Данный метод широко используется для определения теплофизических свойств материалов [94], в том числе, и при проведении реакторных исследований [95, 96, 14].

В регулярном тепловом режиме закон изменения температурного поля со временем приобретает простую экспоненциальную форму. Для случая ступенчатого изменения температуры окружающей среды в стадии регулярного режима разность между температурой любой точки тела и температурой среды изменяется по простому экспоненциальному закону [94]:

$$t(x, y, z, \tau) - t_0 = A \cdot V \cdot e^{-m \cdot \tau} \quad (2.1)$$

где: $t(x, y, z, \tau)$ – температура в выбранной точке образца в момент времени τ ; t_0 – температура окружающей среды; A – коэффициенты; V – собственные функции задачи; m – темп регулярного режима.

Важнейшей характеристикой при использовании данного метода является темп регулярного режима – это величина, которая позволяет дать некоторую общую

характеристику оценки быстроты реакции тела или системы на воздействие окружающей среды. Темп регулярного режима сохраняет одно и то же значение в стадии регулярного охлаждения (нагревания) для всех точек системы. Обратной к темпу регулярного режима величиной (имеющей размерность времени) является показатель тепловой инерции. [94]

В настоящей работе приведено описание применение метода регулярного режима в случае изменения тепловой нагрузки на образец. Рассмотрен усовершенствованный подход к использованию метода при соблюдении конкретного способа инструментации цилиндрического образца термопарами. Проработка данного подхода и примеры его применения рассмотрены в Разделе 4.1.

Одно из достоинств нестационарного метода регулярного режима - слабая чувствительность результатов измерений к точности градуировки датчиков температуры в реакторе. Еще одним преимуществом нестационарных методов является то, что необходимую экспериментальную информацию можно получить за относительно короткий период переходного процесса. Нестационарные режимы работы реализуются, в частности, в периоды пуска реактора, изменения его мощности и другие [14].

2.3. Инструментация экспериментальных образцов термопарами

При измерении температуры образца, на котором проводилась отработка расчетно-экспериментального метода определения инерции системы «термопара-объект контроля» (Раздел 4.2), использовались термопары типа ХА с электродами хромель-алюмель (ГОСТ Р 8.585-2001, ГОСТ 6616-94).

Экспериментальный образец представлял собой цилиндр из алюминия, на котором были закреплены термопары различными способами.

Регистрация показаний термопар производилась при помощи мультиметра, производства компании Agilent (измерения температур проводились с использованием специального модуля).

С использованием программы, написанной в пакете MathCad, проводились расчеты отклонения показаний термопары от реальной температуры экспериментального образца.

2.4. Программы для расчетов процессов, проходящих внутри твэлов под облучением (в том числе, для оценок распределения температуры внутри инструментированных твэлов)

В качестве базы для проведения расчетов внутритвэльных процессов в настоящей работе использовались коды серии PIN [23, 97, 98, 99], которые ранее применялись для моделирования поведения твэлов реакторов типов PWR и ВВЭР в процессе нормальной эксплуатации. В частности, данные коды использовались в 80-90-х годах в Курчатовском институте для оценок процессов в твэлах, испытания которых проводились на исследовательском реакторе МР. Коды серии PIN стали основой для разработки новых усовершенствованных расчётных программ [100].

На базе кодов серии PIN была разработана модифицированная программа, получившая условное название SOTAR (COTAP). Программа SOTAR применялась в настоящей работе для моделирования процессов, проходящих внутри твэлов в процессе облучения. Полученные в SOTAR данные использовались для дальнейших оценок распределения температуры в инструментированных термопарами твэлах. Эти оценки проводились с использованием пакета MathCad.

Текущая версия твэльного кода SOTAR предназначена для оценок процессов в твэлах с сердечником из UO_2 и с оболочками твэлов для перспективных ЯЭУ при их облучении до относительно небольших выгораний. Программа написана на языке FORTRAN и состоит из основной программы и описывающих отдельные процессы подпрограмм. Исходные данные загружаются в Excel-файле.

В процессе расчётов с использованием программы SOTAR для опытного твэла реальная история облучения твэла моделируется для заданного количества последовательных временных шагов. При расчете твэл разбивается на 10 сегментов по высоте. На каждом временном шаге рассчитываются как функции от координаты по высоте характеристики, в числе которых: радиальное распределение температуры оболочки и топлива; параметры зазора между топливом и оболочкой; изменение радиуса топлива вследствие термического расширения, релокации, уплотнения и набухания; изменение радиуса оболочки вследствие термоупругости, ползучести и радиационного роста; образование ГПД и их выход в свободный объем. Также

проводятся оценки осевого удлинения топлива, оболочки и внутреннего давления газа для всего твэла.

Для инструментированных твэлов, испытываемых в реакторе ИР-8 в рамках разработки инновационных ВВЭР, на начальных этапах проектирования оценки распределения температур предлагается проводить с использованием упрощенных моделей и программ [101]. Для решения данной задачи была написана и отработана программа в пакете MathCad [102]. В числе исходных данных для расчета инструментированных твэлов в MathCad-программе используются данные, полученные при расчетах в SOTAR для не инструментированных твэлов. Алгоритм и примеры проведения таких оценок приведены в Главе 5.

3. Оптимизация конструкции ампульных устройств для получения представительных данных испытаний на реакторе ИР-8 опытных твэлов проектируемого ВВЭР-СКД

3.1. Макетирование эксперимента, выбор схемы инструментации твэлов и АУ

Описанные в Разделе 1.7.3 особенности водного теплоносителя с СКД-параметрами обуславливают дополнительные требования при подготовке ампульных реакторных испытаний опытных твэлов. Среди требований - необходимость проведения реакторного макетного эксперимента, а также обеспечение точности измерений параметров испытаний. Таким образом, при планировании исследований АУ-СКД с опытными твэлами (АУ-СКД-1) в ИР-8, конструкция которого описана в Разделе 1.7.3.2, предполагается проведение макетного реакторного эксперимента, включающего в себя испытания инструментированных твэлов.

Под макетным реакторным экспериментом в данном случае понимается относительно краткосрочный эксперимент, который является необходимым начальным этапом при подготовке проведения на ИР-8 дальнейших исследований. В данном эксперименте и макетный, и подогревающий твэл будут изготовлены из свежего топлива.

Основными целями макетного эксперимента являются:

- экспериментальное подтверждение принципиальной возможности проведения реакторных испытаний в условиях, приближенных к условиям ВВЭР-СКД;
- проверка выбранной схемы конструкции ампульного устройства перед более длительными исследованиями;
- получение прямых данных о температурах оболочек твэлов.

Полученные в макетном эксперименте данные в дальнейшем должны быть использованы для верификации соответствующих расчетных моделей, для обоснования безопасности экспериментов и для создания алгоритма определения температур на не инструментированных оболочках опытных твэлов, которые планируется исследовать в рамках будущих реакторных испытаний.

При проведении реакторных исследований опытных твэлов корректное определение их температуры в режиме реального времени играет важнейшую роль, как

с точки зрения контроля параметров испытаний и обеспечения безопасности проведения экспериментов, так и с точки зрения получения представительных результатов и данных о теплофизических характеристиках твэлов под облучением. Для достижения этих целей особенно важна корректная инструментация исследуемых твэлов при их испытаниях в условиях естественной конвекции.

При планировании макетного эксперимента предполагается инструментация оболочки макетного твэла термопарами типа ХА, что позволит получить прямые данные по распределению температур оболочки твэлов. Подогревающие твэлы повышенной надежности (за счет утолщения оболочки) планируется инструментировать как в макетном, так и в основном эксперименте.

Для опытных твэлов в основном эксперименте инструментация оболочек не предусматривается. Для них предлагается вариант с заделкой термопар в нижнюю и промежуточную концевые детали (заглушки) опытного твэла, где ТП фиксируется в предварительно сделанном в нижней заглушке «глухом» отверстии. Такой способ был выбран для того, чтобы не нарушать целостность оболочки опытных твэлов, для которых планируется проведение длительных ресурсных испытаний.

Результаты, полученные в макетном реакторном эксперименте на ИР-8 для АУ-СКД-1, предполагается использовать в дальнейшем для контроля температуры оболочки предварительно облученных в реакторе БОР-60 опытных твэлов при их дальнейшем облучении в ИР-8 и интерпретации соответствующих расчетов. Для этого по результатам макетного эксперимента разрабатывается алгоритм определения температуры оболочек опытных твэлов по измеряемым параметрам для его использования в экспериментах с АУ-СКД.

Макетный эксперимент и эксперимент по дооблучению опытных твэлов необходимо проводить при близких условиях (теплогидравлические параметры, схемы конструкции ампульных устройств) для возможности использования алгоритма пересчета температур оболочек опытных твэлов. Необходимо обеспечить равенство значений внешних диаметров макетного и опытного твэла, а также сохранение неизменности конструкции и схемы термометрирования подогревающего твэла в макетном и будущем основном эксперименте. Используя полученные соотношения, текущие экспериментальные данные и необходимые расчетные схемы, будет возможно производить оценки температур оболочек опытных твэлов в режиме реального времени.

При планировании испытаний сравнивались различные способы инструментации оболочки твэлов. Рассматривались как способы крепления ТП на оболочке без углубления (например, при помощи хомута), так и с заделкой в паз.

Одним из преимуществ крепления ТП без углубления является то, что при использовании этого способа не вносятся изменения в оболочку твэла. При этом закрепленная таким способом термопара будет занимать значительное место в ограниченном объеме циркуляционного контура ампульного устройства. Еще одним недостатком является то, что в месте крепления ТП во время испытаний может собираться воздух, что может вызвать локальный перегрев оболочки. Учитывая необходимость минимизации возмущений в теплоносителе АУ-СКД, данный способ инструментации представляется менее предпочтительным.

В результате для макетного и подогревающих твэлов был выбран способ инструментации с заделкой термопары в паз на оболочке (Рисунок 3.1).

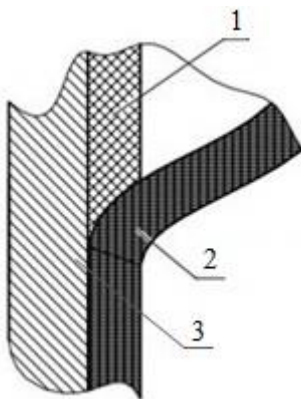


Рисунок 3.1. Иллюстрация инструментации оболочки испытываемого твэла с заделкой термопары в паз: 1 – припой, 2 – термопара, 3 – оболочка твэла

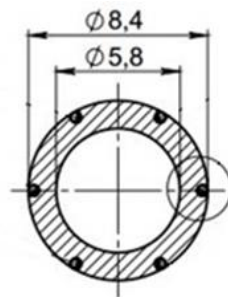


Рисунок 3.2. Схема инструментации оболочки макетного твэла

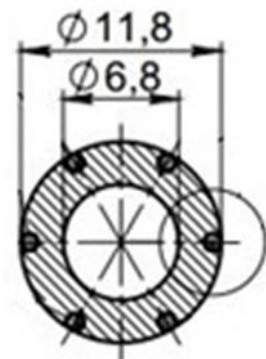


Рисунок 3.3. Схема инструментации оболочки подогревающего твэла

Способ с заделкой термопары в паз позволяет минимизировать место, занимаемое термопарой в объеме циркуляционного контура, и снизить влияние на движение теплоносителя в АУ. О важности минимизации такого влияния говорится, в частности, в работе [103]. При заделке ТП в паз вопросы, связанные с обеспечением прочности и

целостности инструментированной оболочки в процессе испытаний, возможно решить путем ее утолщения, подбора необходимых параметров заделки термопары (Рисунки 3.2 и 3.3).

В оболочках макетного и подогревающего твэлов по всей длине предполагается сделать пазы (например, методом электроэрозии) под размер используемых ТП. Термопары вкладываются в пазы на заданную глубину и припаиваются высокотемпературным припоем. Припоем также запаиваются незадействованные области пазов с тем, чтобы восстановить диаметр оболочки твэла до внешнего диаметра и избежать возможных неравномерностей омывания оболочки рабочей средой АУ-СКД. Для каждой ТП предусмотрена соответствующая глубина паза.

Чувствительные элементы термопар могут быть заделаны в различных местах по высоте твэлов, что позволит получить дополнительную информацию о распределении температуры по высоте твэла.

Точное число термопар, заделанных в оболочку, должно выбираться в процессе конструирования АУ-СКД-1 и по результатам теплогидравлических и прочностных расчетов.

Для макетного и подогревающего твэлов, инструментированных термопарами, были сделаны необходимые прочностные оценки¹. Результаты показывают, что, в частности, сталь ЧС68-ИД х.д., может использоваться в качестве оболочки инструментированных твэлов при заданных условиях испытаний. Практически осуществимой является заделка от 3-х до 6-ти термопар.

Если при поиске возможных изготовителей оболочек с заданными размерами в процессе проектирования макетных и подогревающих твэлов будет определено, что найти необходимые оболочки из стали ЧС68-ИД х.д. затруднительно, возможно рассмотреть использование другого материала-аналога.

При необходимости, для твэлов, испытываемых в АУ-СКД-1, могут быть реализованы и измерения центральной температуры топлива при помощи термопары. Такие измерения дали бы важную дополнительную информацию, которую в последующем можно использовать, в частности, для верификации расчетных моделей.

Важным вопросом получения данных о параметрах реакторного эксперимента с опытными твэлами является оснащение датчиками самого ампульного устройства.

¹ Прочностные расчеты проводились Алексеем С. Киселевым и Александром С. Киселевым

Основные датчики для инструментации АУ-СКД представлены в Таблице 3.1.

Таблица 3.1. Экспериментальные параметры и основные типы датчиков при испытаниях в АУ-СКД

Контролируемый параметр	Датчик
Температура воды по высоте АУ-СКД	Термопары (ХА)
Давление теплоносителя в АУ-СКД, сигнализация о разгерметизации объема АУ-СКД	Датчики давления
Плотность потока тепловых нейтронов	Два датчика ДПЗ
Активность теплоносителя, сигнализация о разгерметизации твэла в АУ-СКД	Два гамма-датчика

Выбор мест размещения термопар в объеме теплоносителя должен быть согласован с результатами проведенных теплогидравлических расчетов. При расположении термопар в потоке теплоносителя, предполагается, что их оптимальное месторасположение должно:

- находиться по радиусу водного потока в расчетном месте максимального значения температуры теплоносителя;
- по высотной координате соответствовать месту расположения термопар на оболочке твэла;
- находиться в верхней и нижней точках движения теплоносителя.

Таким образом, проведение макетного реакторного эксперимента с инструментацией твэлов и самого ампульного устройства рассматривается в качестве одного из способов повышения контролируемости параметров испытаний опытных твэлов в среде теплоносителя с СКД-параметрами в АУ-СКД-1. Проведение макетного реакторного эксперимента также должно позволить получить прямые данные о температуре оболочек испытываемых твэлов и повысить представительность результатов облучений опытных твэлов в условиях косвенных измерений.

3.2. Реакторный эксперимент с использованием внутриампульной конвекционной петли

3.2.1. Схема конструкции АУ с внутриампульной конвекционной петлей

В процессе разработки АУ-СКД-1 (Разделы 1.7.3.2 и 3.1) для облучения опытных твэлов была выявлена необходимость проведения дополнительного эксперимента по изучению поведения СКД-теплоносителя под облучением и получению необходимых верификационных данных для расчетных моделей. В качестве такого эксперимента было предложено провести реакторные испытания ампульного устройства с имитаторами твэлов без топливного сердечника. Таким образом, было выделено второе направление проектирования, в рамках которого разрабатывалось АУ для реакторных исследований имитаторов твэлов в среде СКД-теплоносителя (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.

В качестве испытываемого образца в данном случае предполагается использовать имитатор твэла с сердечником из вольфрама и оболочками из кандидатных материалов для твэлов реактора ВВЭР-СКД. Также могут испытываться и полые оболочки.

Необходимые 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. Нагреватели успешно используются в испытаниях по облучению АУ с конструкционными материалами на реакторе ИР-8 [104].

Одним из важных преимуществ предлагаемой конструкции АУ-СКД является возможность автоматического контроля, стабилизации и регулирования температуры и, следовательно, расхода теплоносителя с СКД-параметрами, благодаря малой зависимости от мощности реактора, и управлению при помощи внешних электрических нагревателей.

Аналогично уже ранее рассмотренному варианту АУ-СКД-1 для АУ-СКД-2 также планируется использовать схему конструкции с одним имитатором твэла сверху и одним подогревающим твэлом внизу. В данном случае, предполагается, что мощность подогревающего твэла должна быть значительно больше мощности верхнего образца. Планируется, что в ячейке отражателя реактора будет располагаться защитный вольфрамовый блок-экран, благодаря которому энерговыделение за счет поглощения реакторного излучения в имитаторе твэла и в конструктивных элементах АУ будет значительно снижено. Наличие блок-экрана позволит избежать чрезмерного в данном случае влияния энерговыделения в стенке ампулы на параметры теплоносителя, что важно для создания естественной конвекции.

Благодаря наличию разделительной трубы в АУ-СКД-2 образуется циркуляционный контур с подъемным и опускным участком движения теплоносителя (Рисунок 3.4). Для снижения перетечек тепла из подъемной в опускную ветвь и достижения более равномерных значений температуры и скорости по сечению воды разделительная труба должна иметь закрытый сверху изоляционный зазор (например, в виде газового или зазора, заполненного СКД-теплоносителем). Данная схема допускает снижение температуры верха опускного потока за счет передачи тепла в компенсатор объема и дальнейшего сброса в бассейн реактора. Тщательный выбор соотношений давления и температуры опускной и подъемной части контура, а также снижение гидравлических сопротивлений по всему контуру играет

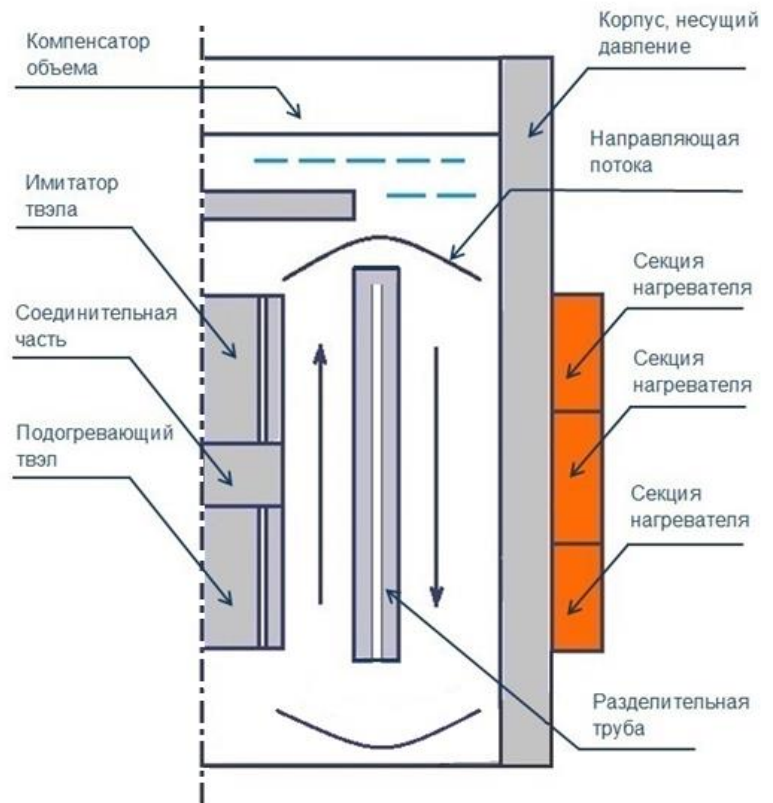


Рисунок 3.4. Принципиальная схема циркуляционного контура в АУ-СКД с внутри-ампульной конвекционной петлей

решающую роль для роста скорости движения теплоносителя. Таким образом, в АУ-СКД-2 планируется реализовать вариант внутриампульной конвекционной петли.

В рабочем объеме АУ-СКД-2 образуется подогретый нижним твэлом поток теплоносителя. Предполагается, что наличие потока обеспечит равномерное распределение температуры («плато») по высоте твэлов (как минимум, для верхнего образца имитатора твэла). Равномерность температуры оболочки сделает результаты эксперимента более представительными. И позволит получить необходимые материалы для проведения дальнейших послереакторных исследований в требуемом объеме.

В качестве подогревающего возможно использовать твэл повышенной надежности с диоксидом урана и оболочками из кандидатных материалов для твэлов ВВЭР-СКД или из аналогов. Для подогревающего твэла не планируется обязательно задавать параметры (в частности, геометрические размеры), которые необходимо обеспечить для оболочек испытываемого имитатора твэла. Поэтому повышенная надежность подогревающего твэла может быть достигнута, в частности, за счет утолщения его оболочки. При этом учитывая, что на сегодняшний день нет информации о проведении реакторных экспериментов по испытаниям опытных твэлов в среде СКД-теплоносителя, представляется, что данные, полученные при облучении не только имитатора твэла, но и подогревающего твэла в АУ-СКД-2, могут представлять интерес для дальнейшего изучения и проведения послереакторных исследований.

Также возможно реализовать вариант конструкции АУ-СКД-2, где вместо подогревающего твэла используется электрический нагреватель. В таком случае, будут исключены риски возможной разгерметизации подогревающего твэла в процессе испытаний.

Конструкцией АУ-СКД-2 предусмотрено наличие компенсатора объема. Возможен сифонный тип компенсатора объема. При разработке конструкции компенсатора объема изменения его параметров должны учитываться совместно с динамикой давления и температуры теплоносителя в ампульном устройстве при выходе АУ на режим.

В АУ-СКД-2 предполагается использовать кабельные электронагреватели, которые выпускаются на основе нагревостойкого кабеля с минеральной изоляцией в стальных оболочках, с жилами из нихрома или никеля, выполняющими роль нагревательного элемента. Благодаря гибкости кабеля, можно придавать нагревателю необходимую

форму для наиболее плотного прилегания к обогреваемой поверхности. Как уже отмечалось, такие нагреватели уже неоднократно использовались в испытаниях по облучению АУ с конструкционными материалами на реакторе ИР-8 [104].

Предполагается, что нагреватель будет состоять из нескольких секций, управляемых при помощи ПИД-регулятора, использование которого также было неоднократно проверено при облучении ампульных устройств с КМ. Описание ПИД-регулятора приведено в Разделе 2.1.

Нагреватель планируется располагать между корпусом, несущим давление, и корпусом ампулы (Рисунок 3.5). Конструкцией предусмотрены зазоры, учитывающие тепловое расширение материалов нагревателя. Зазоры заполнены инертным газом, например, гелием.

Конструкция АУ-СКД-2 дает возможности по оптимизации регулирования температуры циркуляционного контура при помощи нагревателей. Предполагается, что это может повысить скорость движения теплоносителя, что важно при испытании кандидатных материалов оболочек твэлов проектируемого ВВЭР-СКД.



Рисунок 3.5. Один из вариантов схемы сечения АУ для ячейки реактора б-4 с защитным блок-экраном из вольфрама (Все размеры справочные, были взяты для проведения теплогидравлических оценок, и могут быть изменены в процессе разработки АУ)

3.2.2. Оценки теплогидравлических параметров АУ с внутриампульной конвекционной петлей

3.2.2.1. Алгоритм расчета

Для проведения предварительных оценок теплогидравлических параметров СКД-теплоносителя в АУ-СКД-2 с внешним нагревателем 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 упрощений. Представляется, что использованный подход может применяться при выборе принципиальной схемы конструкции АУ на самых начальных этапах проектирования. Демонстрация работы предложенного алгоритма показана при проведении расчетов параметров циркуляционного контура АУ с «холодным» компенсатором объема.

Разработанная программа представляет собой набор связанных файлов: с исходными данными, непосредственно расчетных файлов, файлов с промежуточными и итоговыми результатами, а также файлов, использовавшихся для автоматизации расчета.

В рамках расчета с использованием разработанной MathCad-программы циркуляционный контур АУ-СКД 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 [54], значение которого должно быть одинаковым для каждого объема циркуляционного контура:

$$G = \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{гидр}}}{(\Delta P_{\text{трения}} + \Delta P_{\text{местн}} + \Delta P_{\text{уск}})}} \quad (3.1)$$

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

Расчет сопротивлений проводился с использованием формул из [54, 105]:

$$\text{где } \Delta P_{\text{гидр}} = g * [(\rho_{22} - \rho_{12}) * L_2 + (\rho_{23} - \rho_{13}) * L_3 + (\rho_{21} - \rho_{11}) * L_1] \quad (3.2)$$

ρ – значение средней плотности теплоносителя, соответствующее уровню температур данного объема АУ-СКД-2; L – высота объема;

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{трения}} = \frac{1}{2} * [& \frac{(\xi_{12} * L_2)}{d_{12} * \rho_{12} * (F_1)^2} + \frac{(\xi_{13} * L_3)}{d_{13} * \rho_{13} * (F_1)^2} + \frac{(\xi_{11} * L_1)}{d_{11} * \rho_{11} * (F_1)^2} + \\ & + \frac{(\xi_{21} * L_1)}{d_{21} * \rho_{21} * (F_2)^2} + \frac{(\xi_{23} * L_3)}{d_{23} * \rho_{23} * (F_2)^2} + \frac{(\xi_{22} * L_2)}{d_{22} * \rho_{22} * (F_2)^2}] \end{aligned} \quad (3.3)$$

где ξ_{12} , ξ_{13} , ξ_{11} – сопротивление трения на подъемном участке; ξ_{21} , ξ_{23} , ξ_{22} – сопротивление трения на опускном участке; d – гидравлический диаметр; F – сечение, соответствующее данному объему;

$$\Delta P_{\text{местн}} = \frac{1}{2} * \left[\frac{\zeta_{12}}{\rho_{12} * (F_1)^2} + \frac{\zeta_{21}}{\rho_{21} * (F_2)^2} \right] \quad (3.4)$$

где ζ_{12} – местные сопротивления на подъемном участке (низ потока); ζ_{21} – местные сопротивления на опускном участке (верх потока);

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{уск}} = \frac{1}{(F_1)^2} * \left[\left(\frac{1}{\rho_{12,2}} - \frac{1}{\rho_{12,1}} \right) + \left(\frac{1}{\rho_{13,2}} - \frac{1}{\rho_{13,1}} \right) + \left(\frac{1}{\rho_{11,2}} - \frac{1}{\rho_{11,1}} \right) \right] + \\ + \frac{1}{(F_2)^2} * \left[\left(\frac{1}{\rho_{21,1}} - \frac{1}{\rho_{21,2}} \right) + \left(\frac{1}{\rho_{23,1}} - \frac{1}{\rho_{23,2}} \right) + \left(\frac{1}{\rho_{22,1}} - \frac{1}{\rho_{22,2}} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.5)$$

где ρ_{12_2} – плотность потока на выходе первого объема; ρ_{12_1} – плотность потока на входе первого объема; для других объемов – аналогично.

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

$$W = \frac{G}{\rho * F} \quad (3.6)$$

где G – массовый расход; ρ – средняя плотность теплоносителя и F – сечение, соответствующее конкретному объему циркуляционного контура АУ-СКД.

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 КМ 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 [101]. Использовалась имеющаяся в MathCad встроенная функция Pdsolve для численного решения одномерных нестационарных задач. Pdsolve базируется на численном методе линий (MOL), который применяется для гиперболических и параболических уравнений в частных производных [101].

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

Начальные и граничные условия были записаны следующим образом:

$$T(x, 0) = T_0 \quad - \text{начальное условие}$$

$$-\lambda * T_x(0, \tau) = \alpha * (T(0, \tau) - T_{\text{вход}}) \quad - \text{граничное условие при } x = 0$$

$$-\lambda * T_x(L, \tau) = \alpha * (T(L, \tau) - T_{\text{вых}}) \quad - \text{граничное условие при } x = L$$

где T_0 – начальная температура; λ – коэффициент теплопроводности; α – коэффициент теплоотдачи на границах объема, значение которого должно быть достаточно велико;

T_x – производная по координате; $T_{\text{вход}}$ и $T_{\text{вых}}$ – температуры на входе и выходе для конкретного объема.

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

$$T_{\tau}(x, \tau) = \frac{q_{s1} * \frac{u_1}{F_1}}{\rho * C_p} - W_1 * T_x(x, \tau) + \frac{\alpha_{s2} * (T_{s2} - T(x, \tau)) * \frac{u_2}{F_1}}{\rho * C_p} \quad (3.7)$$

где T_{τ} – 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; α_{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.

Плотность теплового потока на боковой поверхности подогревающего твэла / соединительной части / имитатора твэла определялась по следующей формуле:

$$q_{s1} = \frac{Q}{2 * \pi * r_3 * L} \quad (3.8)$$

где Q – суммарная мощность подогревающего твэла / соединительной части / имитатора твэла; r_3 и L – радиус и высота соответствующего элемента. Величина Q при расчете изменялась в зависимости от мощности реактора. Выбор задаваемых значений Q основывается на результатах предварительных нейтронно-физических расчетов.

При моделировании задавалось низкое значение коэффициента теплоотдачи для разделительной трубы (например, $\alpha_{s2} = 100$ Вт/(м² град)), учитывая, что в рабочем состоянии она будет иметь внутренний зазор, заполненный СКД-теплоносителем.

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

$$T_{\tau}(x, \tau) = \frac{\alpha_{s1} * (T_{s1} - T(x, \tau)) * \frac{u_3}{F_2}}{\rho * C_p} - W_4 * T_x(x, \tau) + \frac{q_{s2} * \frac{u_4}{F_2}}{\rho * C_p} + \frac{\alpha_{s3} * (T_{s3} - T(x, \tau)) * \frac{u_4}{F_2}}{\rho * C_p} \quad (3.9)$$

где α_{s1} – значение коэффициента теплоотдачи для разделительной трубы; α_{s3} – коэффициент, использовавшийся для нахождения значения величины теплового потока,

передаваемого в бассейн реактора; 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 опускаемого участка.

Плотность теплового потока от участка стенки АУ-СКД и соответствующей секции нагревателя определялась по следующей формуле:

$$q_{s2} = \frac{Q}{2 * \pi * r_6 * L} \quad (3.10)$$

где Q – суммарная мощность участка корпуса ампулы (за счет реакторного излучения), определяемая по результатам предварительных нейтронно-физических расчетов, и мощности секции нагревателя, определяемой с учетом работы ПИД-регулятора (подробнее будет описано ниже); r_6 – внутренний радиус корпуса АУ-СКД, несущего давление; L – высота соответствующего элемента. Величина Q при расчете изменялась в зависимости от мощности реактора и мощности нагревателя.

В процессе итерационного расчета коэффициент для нахождения значения величины теплового потока, передаваемого в бассейн реактора, определялся по следующей формуле:

$$\alpha_{s3} = \frac{q_s}{(T - T_{s3})} \quad (3.11)$$

где q_s – мощность участка корпуса и нагревателя, найденная на предыдущем расчетном шаге; T – определяемая температура теплоносителя в соответствующем объеме контура; T_{s3} – температура воды бассейна реактора, задававшаяся равной 50 °С.

Далее в расчете учитывалось влияние движения теплоносителя на уровень температур и на скорость сходимости решения. Вначале определялось значение энтальпии для каждого объема. Используя найденные значения энтальпии, заданный интервал по времени и рассчитанное ранее значение массового расхода, определялось количество тепла за счет движения теплоносителя из одного объема в другой. Далее определялась масса теплоносителя в каждом объеме и приращение энтальпии потока теплоносителя. После рассчитывались значения энтальпии с учетом приращения, по

которому определялись соответствующие величины температуры. Таким образом, находили итоговую матрицу температур для данного цикла. Необходимое число расчетных циклов задавалось при вводе исходных данных. Запуск циклов был автоматизирован.

Расчеты проводились с учетом зависимости свойств теплоносителя с СКД-параметрами от температуры [106].

Предложенная схема позволяет учитывать влияние нагревателя на изменение параметров теплоносителя. Уровень мощности внешнего нагревателя моделировался различными способами. Была рассмотрена возможность ручного регулирования и несколько вариантов автоматического.

В зависимости от конструкции, регулирование мощности секций нагревателя может осуществляться, как взаимосвязано, так и независимо. Конструкция допускает возможность автоматического поддержания необходимой температуры в объеме ампульного устройства с помощью ПИД-регулятора. Регулятор отвечает за достижение измеряемой величиной заданного уровня (уставки) и за дальнейшее поддержание значения этой величины [90]. Измеренная при помощи термопары температура СКД-теплоносителя в контрольном объеме контура сравнивается с уставкой, после чего регулятор вырабатывает выходной сигнал, направленный на уменьшение их рассогласования. При этом 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. Использование ПИД-регулятора в данном случае обеспечивает стабильность выхода АУ на режим.

Предполагается, что при проведении реакторного эксперимента с АУ-СКД на практике регулятор будет обеспечивать выход ампульного устройства на оптимальный рабочий режим с использованием функции автонастройки [90]. Но на этапе выбора схемы конструкции, при отсутствии реального объекта регулирования, необходимо моделирование работы нагревателя с регулятором.

В рамках описанного выше алгоритма расчет температур и скоростей теплоносителя был разбит на последовательные шаги, каждый из которых соответствовал заданному уровню мощности реактора. Такой подход в частности позволяет определить параметры выхода АУ-СКД на рабочий режим. При расчете

учитывалось то, что при повышении мощности реактора мощность нагревателя снижается.

Формула, по которой рассчитывался процент изменения мощности нагревателя от ее заданной начальной величины, имеет следующий вид [90]:

$$Y_i = \frac{1}{X_p} \left(E_i + \tau_d \frac{\Delta E_i}{\Delta t_{\text{изм}}} + \frac{1}{\tau_i} \sum_{i=0}^n E_i \Delta t_{\text{изм}} \right) \quad (3.12)$$

где X_p - полоса пропорциональности, E_i - разность между уставкой и текущим значением T_i температуры, τ_d - дифференциальная постоянная, ΔE_i - разность между двумя соседними измерениями E_i и E_{i-1} , $\Delta t_{\text{изм}}$ - время между соседними двумя измерениями T_i и T_{i-1} , τ_i - интегральная постоянная, $\sum_{i=0}^n E_i$ - накопленная в i -й момент времени сумма рассогласований (интегральная сумма).

Сделанные предварительные оценки показывают, что применение нагревателя с ПИД-регулятором, при моделировании работы которого использовались специально подобранные коэффициенты, обеспечивает более оптимальный выход АУ-СКД на рабочий режим, чем для АУ с нагревателем без регулятора. [89] Нужно отметить, что уменьшение колебаний температуры при выходе на режим является важным условием с точки зрения исключения возможных избыточных воздействий на конструкционные материалы, использованные в АУ-СКД.

3.2.2.2. Результаты расчетных оценок

С использованием описанной выше MathCad-программы были сделаны расчетные оценки для выбранного варианта конструкции АУ-СКД-2 (Рисунок 3.5) с варьированием исходных размеров некоторых конструктивных элементов ампулы.

В качестве исходных данных принималось, что давление в АУ-СКД-2 – 30 МПа. Температура оболочки верхнего имитатора твэла должна быть не более 550 °С. Внешний диаметр корпуса, несущего СКД-давление - 32 мм. Высота нижнего твэла - 100 мм, высота верхнего имитатора твэла с вольфрамовым сердечником - 100 мм. Имитатор твэла, подогревающий твэл и соединительная часть имели в данном случае одинаковый внешний диаметр – 8.4 мм. Временной интервал расчета для каждого участка задавался равным 0.1 с. Внутренний и внешний диаметр разделительной трубы и высота соединительной части между образцами – варьировались.

При расчете было предусмотрено автоматическое регулирование работы нагревателя с ПИД-регулятором в зависимости от температуры теплоносителя. В качестве уставки в данном случае задавалось значение температуры теплоносителя нижнего объема опускного участка, равное 445 °С. Для нижнего твэла задавалось значение тепловой нагрузки $q_L \sim 33$ Вт/см, что соответствует 30% мощности при облучении АУ-СКД в первом ряду отражателя реактора или 100% мощности – при облучении в третьем ряду. Полученные графики, иллюстрирующие динамику температур теплоносителя на уровне верхнего имитатора твэла и в контрольном объеме при установлении стационарного состояния для АУ-СКД с варьированием исходных размеров, представлены на Рисунках 3.6 – 3.8.

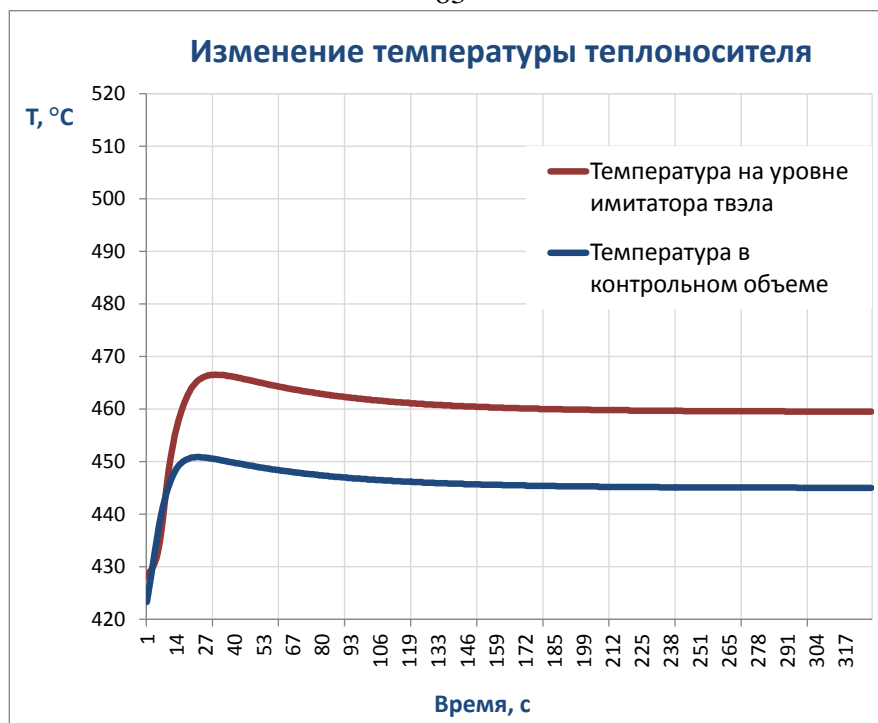


Рисунок 3.6 - Изменение температуры СКД-теплоносителя от времени для размеров: внутренний радиус разделительной трубы = 6,5 мм, внешний = 8,5 мм, высота соединительной части между образцами = 4 мм

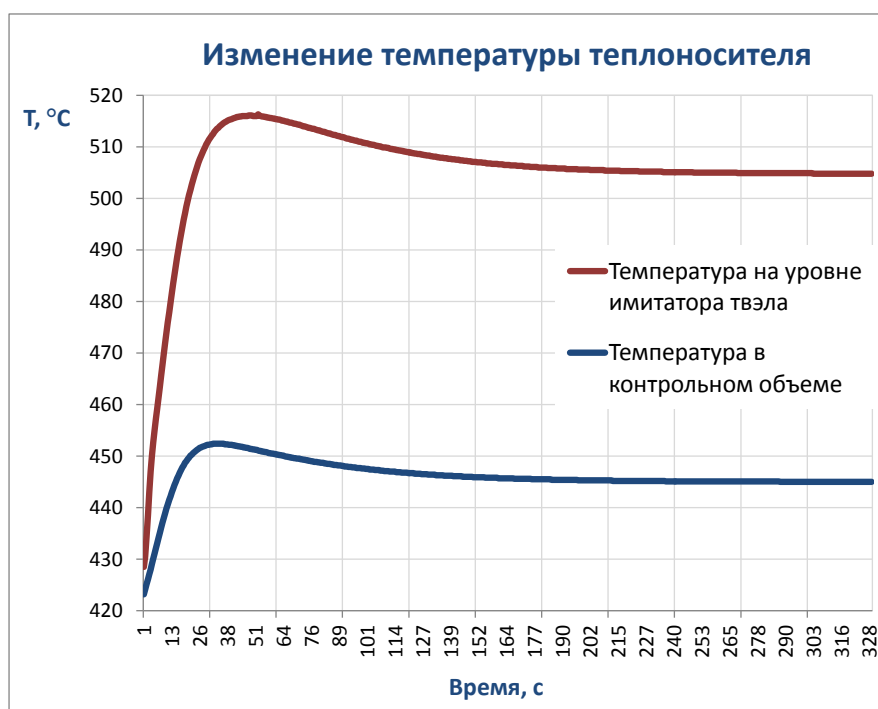


Рисунок 3.7 - Изменение температуры СКД-теплоносителя от времени для размеров: внутренний радиус разделительной трубы = 4,8 мм, внешний = 6,8 мм, высота соединительной части между образцами = 4 мм

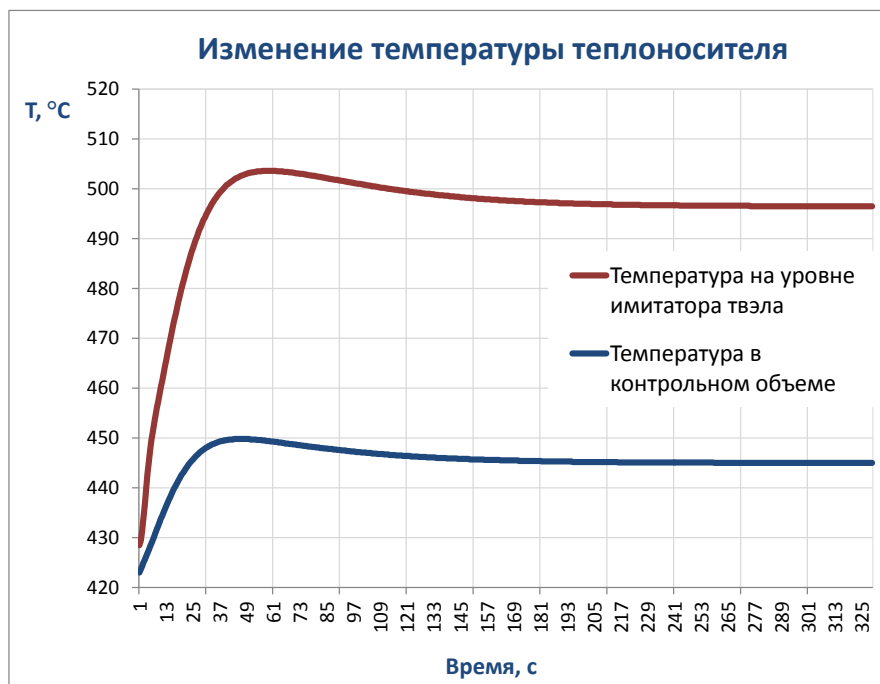


Рисунок 3.8. Изменение температуры СКД-теплоносителя от времени для размеров: внутренний радиус разделительной трубы = 4,8 мм, внешний = 6,8 мм, высота соединительной части между образцами = 10 мм

Из рисунков 3.6 и 3.7 видно, что при уменьшении внутреннего и внешнего радиуса разделительной трубы (при сохранении ее толщины) температура теплоносителя на уровне имитатора твэла значительно возрастает. При увеличении высоты разделительной части между нижним и верхним образцом (Рисунок 3.8) температура на уровне имитатора твэла снижается. При этом температура теплоносителя в контрольном объеме, управляемая при помощи ПИД-регулятора, через определенное число циклов устанавливается на уровне, заданном уставкой.

Полученные результаты (Рисунки 3.6 – 3.8) демонстрируют чувствительность разработанной расчетной модели к изменению входных параметров (в частности, размеров) и показывают возможность использования модели для сравнения различных вариантов конструкции АУ-СКД на начальных этапах проектирования.

Вариант конструкции АУ-СКД с внутренним радиусом разделительной трубы = 4,8 мм, внешним = 6,8 мм, высотой соединительной части между образцами = 4 мм (Рисунок 3.7) представляется на текущем этапе наиболее оптимальным из рассмотренных. Для данного варианта конструкции ампульного устройства был построен график изменения скорости теплоносителя в объеме на уровне имитатора твэла при выходе АУ-СКД на режим (Рисунок 3.9).

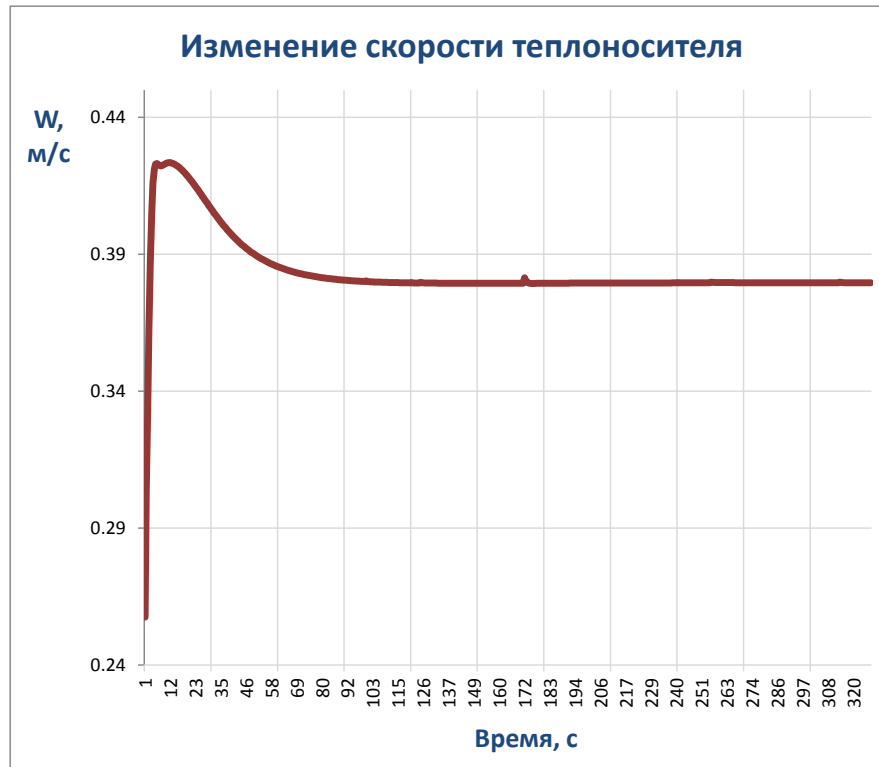


Рисунок 3.9 - Изменение скорости СКД-теплоносителя от времени для размеров: внутренний радиус разделительной трубы = 4,8 мм, внешний = 6,8 мм, высота соединительной части между образцами = 4 мм

Колебания значений скорости в начале расчета могут быть, в частности, объяснены колебаниями при выходе АУ-СКД-2 на режим, и быть связаны со сходимостью решения для данного варианта конструкции ампулы. При интерпретации данных по динамике скорости нужно учитывать, что этот параметр напрямую не контролируется ПИД-регулятором.

Проведение предварительных оценок позволяет выбрать на начальных этапах проектирования варианты конструкции ампульного устройства, для которых следует далее проводить уточняющие и более затратные по времени расчеты в рамках моделирования с использованием, в частности, CFD-методов (компьютерные гидродинамические коды).

Согласно проведенным предварительным оценкам теплогидравлических параметров для выбранного варианта конструкции АУ-СКД-2 установившиеся температуры теплоносителя на уровне имитатора твэла могут достигать значений ~ 505 °С; скорость движения теплоносителя в области испытываемого имитатора твэла достигает ~ 0.4 м/с. Такие результаты являются приемлемыми с точки зрения

соответствия параметрам, требуемым в экспериментах по испытаниям оболочек твэлов проектируемого ВВЭР-СКД.

3.2.3. Схема инструментации имитаторов твэлов и АУ с внутриампульной конвекционной петлей

Имитаторы твэлов, а также подогревающие твэлы в варианте конструкции АУ-СКД-2 с внутриампульной конвекционной петлей могут быть инструментированы термопарами. Для заделки термопар на оболочке испытываемого имитатора твэла возможно использовать уже рассмотренный в Разделе 3.1 способ заделки в паз. Соблюдение требований прочностных расчетов с точки зрения сохранения работоспособности оболочки в процессе облучения может быть достигнуто за счет ее утолщения при неизменности величины ее внешнего диаметра. Также для получения дополнительной информации термопара может быть размещена и в вольфрамовом сердечнике имитатора твэла.

При инструментации самого ампульного устройства предполагается использовать типы датчиков, аналогичные тем, которые рассматривались для инструментации АУ-СКД-1 (Таблица 3.1 в Разделе 3.1).

Для АУ-СКД-2 в предусмотренном зазоре разделительной трубы может быть осуществлена проходка дополнительных термопар, чувствительные элементы которых будут выведены из трубы для измерения температуры потока теплоносителя. Конструкция разделительной трубы с термопарами должна быть отдельно проработана в процессе проектирования ампульного устройства.

Размещение термопар в зазоре разделительной трубы позволит измерять температуру в разных объемах подъемного и опускного участка циркуляционного контура в конкретных точках. Такая схема инструментации ампульного устройства термопарами повышает точность проводимых измерений, а также позволяет минимизировать место, занимаемое ТП в циркуляционном контуре, и их влияние на движение потока теплоносителя.

Заключение по разделу 3

На основании анализа возможных конструктивных схем и сделанных расчетных оценок вариант конструкции ампульного устройства с использованием внутриампульной конвекционной петли представляется перспективным для проведения на реакторе ИР-8 исследований свойств имитаторов твэлов и оболочек твэлов в среде СКД-теплоносителя.

Можно отметить следующие 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 более оптимальный 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. Реализация эксперимента позволит сделать важнейший шаг по демонстрации практической возможности реакторных испытаний опытных твэлов в ампульном устройстве, где создана среда с параметрами теплоносителя, близкими к СКД, и расширит возможности по проведению испытаний в рамках общей программы исследований. Также такой эксперимент на реакторе ИР-8 может рассматриваться в качестве макетного и верификационного.

Использование имитатора твэла с сердечником из вольфрама в качестве исследуемого образца значительно уменьшает риски при возможной разгерметизации твэла в процессе облучения. Также использование имитатора твэлов с сердечником из вольфрама существенно облегчает их изготовление и обращение с ними (по сравнению с твэлами с UO_2).

Кроме того, в процессе испытаний АУ-СКД-2 с имитаторами твэлов могут быть получены важнейшие экспериментальные данные по поведению кандидатных оболочек твэлов в среде СКД-теплоносителя. Одной из важных задач планируемой общей программы исследований [62] является изучение влияния радиационной составляющей на коррозионную стойкость оболочек твэлов при облучении в среде теплоносителя с параметрами СКД. Такая «внешняя» задача может быть решена при облучении образцов в АУ-СКД-2.

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. Как уже отмечалось ранее в Разделе 1.7.3, для решения данной задачи важна неизотермичность СКД-теплоносителя и организация массопереноса в рабочем объеме АУ. В предлагаемом варианте АУ-СКД для испытаний имитаторов твэлов предусматривается круговая циркуляция теплоносителя, благодаря наличию разделительной трубы в рабочем объеме ампулы. При планировании экспериментов по исследованиям свойств оболочек твэлов нужно пытаться достичь максимальных скоростей теплоносителя.

В данном случае качестве одного из вариантов проведения сравнительного эксперимента может быть предложено облучение в реакторе ИР-8 при схожих условиях двух (или нескольких) АУ-СКД с имитаторами твэлов идентичной конструкции с различными характеристиками водно-химического режима теплоносителя с параметрами СКД. Еще одним вариантом исследований АУ-СКД с имитаторами твэлов может быть облучение при отличающихся потоках нейтронов ампульных устройств идентичной конструкции и с одинаковыми параметрами водно-химического режима. Предполагается, что это может помочь определению особенностей радиолиза водного теплоносителя с параметрами СКД. Полученные результаты могут быть, в частности, использованы при верификации расчетных моделей радиолиза водного теплоносителя с СКД-параметрами.

Стоит отметить, что возможность подбирать материалы циркуляционного контура в АУ-СКД-2, наряду с другими факторами, повышает представительность результатов эксперимента в части отработки различных вариантов водно-химического режима. Это обеспечивается благодаря возможности исключить материалы, не предусмотренные

конструкцией активной зоны проектируемого реактора ВВЭР-СКД, и, как следствие, исключить попадание продуктов их коррозии в теплоноситель в процессе испытаний. Это позволит обеспечить условия эксперимента, максимально приближенные к натурным.

4. Совершенствование методов контроля параметров реакторных испытаний опытных ТВЭЛОВ

4.1. Использование метода регулярного теплового режима для определения энерговыделения в образцах

Знание величины энерговыделения в образцах важно для корректности проведения теплогидравлических расчетов. Для определения величины энерговыделения (q_v) в сердечниках имитаторов ТВЭЛОВ в процессе их испытаний в ампульном устройстве предлагается использовать нестационарный метод регулярного теплового режима. Описание метода приведено в Разделе 2.2. При установке термопар в сердечнике из вольфрама можно получить в процессе реакторного эксперимента чрезвычайно важные данные для экспресс-оценки уровня энерговыделения в сердечнике имитатора ТВЭЛА.

С целью подтверждения возможности применения нестационарного метода регулярного теплового режима для экспериментального определения величины энерговыделения в образцах, облучаемых в реакторе ИР-8, проводились соответствующие расчеты с использованием экспериментальных данных, полученных при облучении в отражателе реактора образцов конструкционных материалов.²

Облучения образцов проводились с использованием специальных экспериментальных устройств (ЭУ). ЭУ состояли из опытного образца в форме цилиндра с внешним диаметром 39 мм, оснащенного тремя термопарами, экспериментального канала, заполненного воздухом и бериллиевым блоком, служащим внешним вытеснителем воды, поступающей из бассейна реактора. Для контроля температуры воды использовались две термопары, находящиеся на входе и выходе потока воды экспериментального устройства. В эксперименте применялись термопары типа ХА.

В третьем ряду отражателя реактора было исследовано два типа экспериментальных образцов, изготовленных из нержавеющей стали (облучался в

² Расчеты с применением метода регулярного теплового режима проводились под руководством к.т.н. В.Н. Мурашова. Экспериментальные данные по температуре образцов получены начальником ЛРИ ОРиПЭЯР ОРМиТ КК НБИКС-ПТ НИЦ «Курчатовский институт» О.В. Михиным и начальником группы ЛРИ А.Н. Абрамовым.

ячейке 8-5) и титана (облучался в ячейке 8-3). Образцы и отверстия под термопары в них были изготовлены с большой (микронной) точностью методом электроэрозии. Подробное описание устройства приводится в работе [92]. Схема сечения ЭУ приводится на Рисунке 4.1.

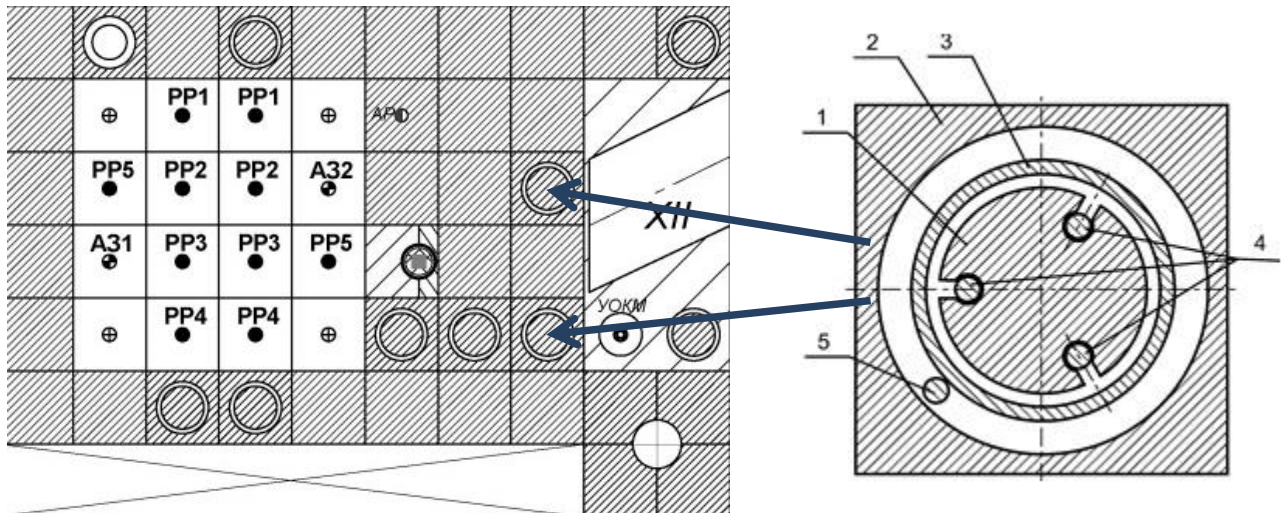


Рис.4.1 - Расположение ЭУ в ячейках отражателя реактора и схема сечения ЭУ с опытным образцом, где 1 – исследуемый (опытный) образец; 2 – бериллиевый блок отражателя (вытеснитель); 3 – «сухой» канал, заполненный воздухом; 4 – термопары, измеряющие температуру внутри образца; 5 - ТП, контролирующая температуру воды

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.

Как уже отмечалось ранее в Разделе 1.8, в термопарах могут возникать погрешности, вызванные воздействием реакторного излучения (мгновенные и интегральные эффекты). В проводившемся эксперименте влияние интегральных эффектов не учитывалось, принимая во внимание краткосрочность испытаний. Влияние мгновенных эффектов также в данном случае является незначительным. Возможное изменение калибровки термопар за счет мгновенных эффектов, возникающих в ТП под облучением, в данном случае не играет существенной роли, так как при расчете величины энерговыделения учитывается дельта показаний одной и той же термопары в разные моменты времени в рамках текущего шага изменения мощности (подробнее будет рассмотрено далее).

В ходе эксперимента мощность реактора ИР-8 повышалась ступенями 0,5–1 МВт. Подробно рассмотрены данные для последней ступени подъема мощности реактора в интервале 3,9–4,8 МВт, имевшей достаточное время для перехода в стационарное тепловое состояние (менее 100 с). Время выдержки на данной ступени составляло более 6000 с.

На Рисунках 4.2 и 4.3 приводятся хронограммы записи показаний термопар в образцах, исследовавшихся в ячейке 8-3 и в ячейке 8-5 .

При анализе данные температуры цилиндрического образца, полученные во время нагрева, были формально заменены на изменение температуры при остывании в соответствии с рекомендацией работ [14, 107, 108]. При этом на каждой ступени подъема мощности определялась максимальная величина зафиксированной температуры (T_{\max}) для каждой термопары и в полулогарифмическом масштабе наносилась величина избыточной температуры, которая определялась по зависимости:

$$U = T_{\max} - T(t), \quad (4.1)$$

где $T(t)$ – зафиксированные значения температур по показаниям термопар.

Графическое отображение экспериментальных данных температуры в полулогарифмическом варианте может быть описано линейной зависимостью от времени, что свидетельствует о наступлении регулярного режима. На Рисунках 4.2 и 4.3 регулярность теплового процесса проиллюстрирована для временного интервала длительностью до 1000 с. В том случае, когда термопара располагается в «критической» точке (радиусе) цилиндра (по терминологии работы [(94)]), после повышения мощности реактора регулярный режим начинается с самого начала процесса (при $t=0$). Именно такое расположение термопар в образцах имело место при их облучении в отражателе реактора ИР-8.

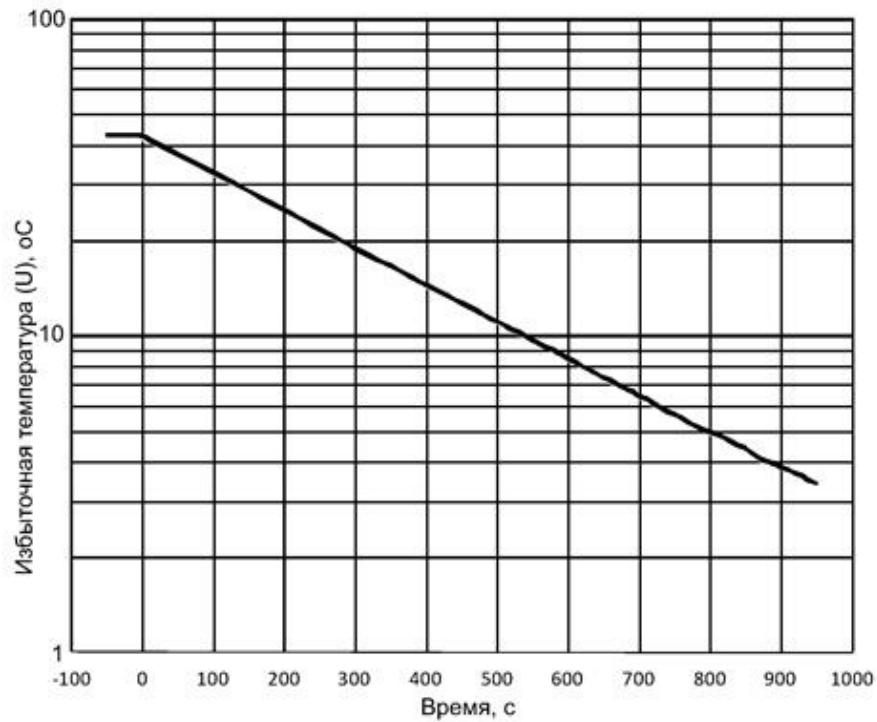


Рисунок 4.2 - Показания термопары, преобразованные в соответствии с уравнением (4.1) для образца, проходившего облучение в ячейке 8-3, после подъема тепловой мощности реактора в диапазоне 3,9 – 4,8 МВт

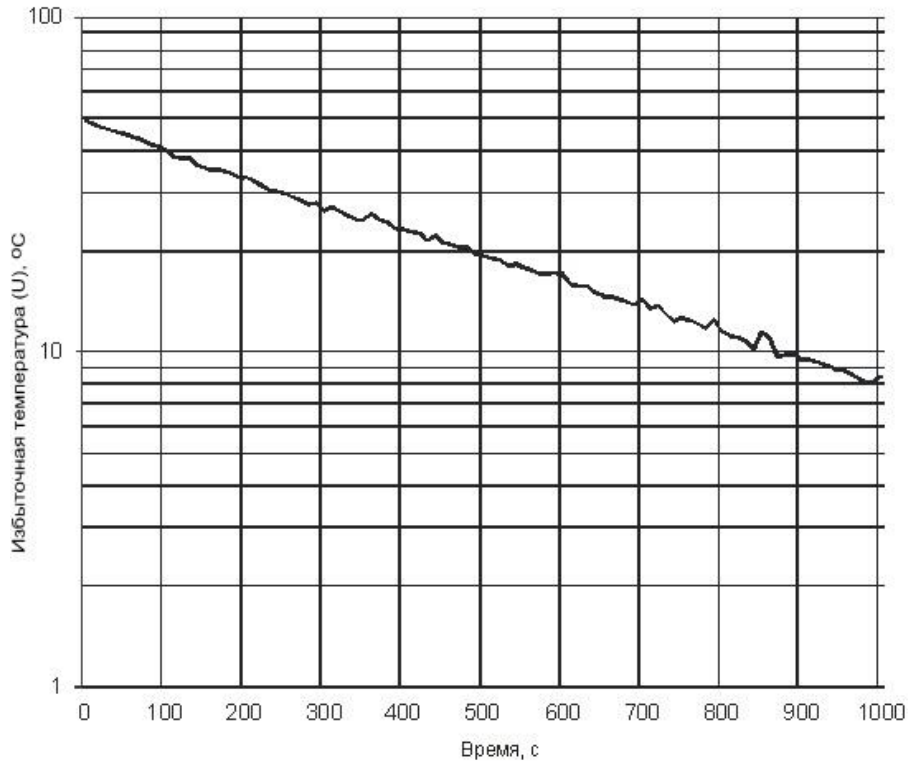


Рисунок 4.3 - Показания термопары, преобразованные в соответствии с уравнением (4.1) для образца, проходившего облучение в ячейке 8-5, после подъема тепловой мощности реактора в диапазоне 3,9 – 4,8 МВт

Упрощенное выражение для определения критического радиуса цилиндра (при малой величине критерия $Bi \rightarrow 0$), может быть записано в виде [94]:

$$R_{кр} = R_0 / \sqrt{2} \quad (4.2)$$

где R_0 – радиус цилиндра.

Математически зависимость для избыточной температуры представлена в следующем виде [106, (94)] для $t \geq 0$:

$$U(t) = T_{\max}(r) - T(r, t) = U_0 \exp(-m \cdot t) \quad (4.3)$$

где $U_0 = T_{\max}(r) - T(r, 0)$ – максимальная избыточная температура; $T(r, t)$ – текущее значение температуры цилиндра (по показаниям термопар); $T_{\max}(r, \infty)$, $T(r, 0)$ – соответственно конечное (максимальное для данной ступени) значение температуры (при нагреве) и начальное значение; t – текущее время; m – темп регулярного режима [94].

Факт расположения термопары в «критическом» радиусе цилиндра позволяет провести следующие преобразования. Для времени $t = 0$ определяется производная по времени, дифференцируя уравнение (4.3):

$$\frac{dT(0)}{dt} = m \cdot U_0 \quad (4.4)$$

Для цилиндра связь температуры с энерговыведением можно найти в работах [108, 109], где решение для нагрева находилось методом собственных функций:

$$\theta(r, t) = T(r, t) - T(r, 0) = q_v \cdot \frac{R_0^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n J_0(\mu_n \cdot r) \frac{1}{\mu_n^2} (1 - e^{-t/\tau_n}); \quad (4.5)$$

где q_v – тепловыделение; $T(r, 0)$ – начальная температура; R_0 – радиус цилиндра; $A_n = \frac{2 \cdot J_1(\mu_n)}{\mu_n \cdot [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]}$ при $\tau_0 > \tau_1 > \tau_2 \dots \tau_n$; μ_n – корни уравнения $J_0(\mu) / J_1(\mu) = \mu / Bi$, где Bi – число Био; J_0 и J_1 – функции Бесселя первого рода, соответственно

нулевого и первого порядка; $r=R/R_0$ – переменный радиус; λ – коэффициент теплопроводности; t – время; $\tau_n=1/m_n$ – период релаксации (величина инерции).

Уравнение (4.5) удобнее и нагляднее использовать для экспериментального определения темпа регулярного режима в форме охлаждения. В этом случае выражение будет выглядеть:

$$\theta(r, t) = T_{\max}(r) - T(r, t) = q_v \cdot \frac{R_0^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n J_0(\mu_n \cdot r) \frac{1}{\mu_n^2} (e^{-t/\tau_n}); \quad (4.6)$$

где $T_{\max}(r)$ – конечная, максимальная температура для данной ступени.

При возможности определения производной по экспериментальной зависимости для времени $t=0$:

$$\frac{d\theta(r,0)}{dt} = \frac{dT(r,0)}{dt} = q_v \cdot \frac{1}{c_p \cdot \rho} \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n J_0(\mu_n \cdot r); \quad (4.7)$$

С учетом аналитических решений тепловых задач [94, 109], содержащих тепловыделение для цилиндра, для времени $t = 0$ выражение суммирования в уравнении (4.7) имеет вид $\sum_{n=1}^{n=\infty} A_n J_0(\mu_n \cdot r) = 1$. Тогда последнее уравнение преобразуется в следующее:

$$\frac{dT(r,0)}{dt} = q_v \cdot \frac{1}{c_p \cdot \rho}. \quad (4.8)$$

Подставляя из выражения (4.4) зависимость для производной по времени в уравнение (4.8), окончательно получим рабочее уравнение, которое может использоваться для оперативного нахождения средней величины тепловыделения, при расположении термопары в «критическом» радиусе цилиндрического образца:

$$q_v = \frac{dT(0)}{dt} \cdot (C_p \cdot \rho) = m \cdot U_0 \cdot (C_p \cdot \rho) \quad (4.9)$$

где ρ – плотность материала; C_p – удельная теплоемкость материала.

Представленный метод разработан в приближении постоянной по объему образца плотности тепловыделения. Так как на практике чаще всего встречаются случаи неравномерного распределения плотности внутренних источников тепла в исследуемых образцах, то обозначенное выше допущение необходимо учитывать при интерпретации

рассчитанных по уравнению (4.9) значений q_v с использованием предложенного метода регулярного теплового режима в случае расположения термопары в «критическом» радиусе цилиндрического образца.

Возможность применения уравнения (4.9) для определения энерговыделения в образцах была продемонстрирована с использованием соответствующих экспериментальных данных. Необходимые физические свойства материалов образцов [110] были взяты для середины диапазона изменения температуры, соответствующего последней ступени подъема мощности реактора (3.9 – 4.8 МВт). Данные для этой ступени приведены в Таблице 4.1. Для каждой из предыдущих ступеней подъема мощности значения температуры образцов, соответствующие стационарному состоянию, определялись расчетным путем (с использованием экстраполяции экспериментальных данных).

Таблица 4.1 - Физические данные для материалов образцов, облучавшихся в ячейках 8-5 и 8-3

Параметр	Значение для ячейки 8-5, материал образца - нержавеющая сталь	Значение для ячейки 8-3, материал образца - титан
Диапазон изменения температуры образцов по показаниям термопар, °С	408 ÷ 457,	327 ÷ 370,
Средняя температура, °С	433	348
Диапазон изменения тепловой мощности реактора для рассматриваемой ступени подъема, МВт	3,9 ÷ 4,8	3,9 ÷ 4,8
Время выхода на ступень / выдержки на данной ступени мощности реактора, с	менее 100 / более 6000	менее 100 / более 6000
Плотность материала, ρ , кг/м ³	7800	4500
Удельная теплоемкость материала, C_p , Дж/(кг °С)	550	578
Параметр инерции (темп регулярного режима, Рисунки 4.2 и 4.3), 1/с	$1,82 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$

На рисунке 4.4 приведены результаты определения с использованием уравнения (4.9) энерговыделения в образцах для всех ступеней при подъеме мощности реактора в

процессе пуска 22.06.22. Для финальной ступени мощности приведено сравнение рассчитанных значений тепловыделения с данными работы [92], где q_v определяли с использованием других расчетных подходов. Из представленных графиков видно, что полученные результаты достаточно хорошо согласуются между собой.

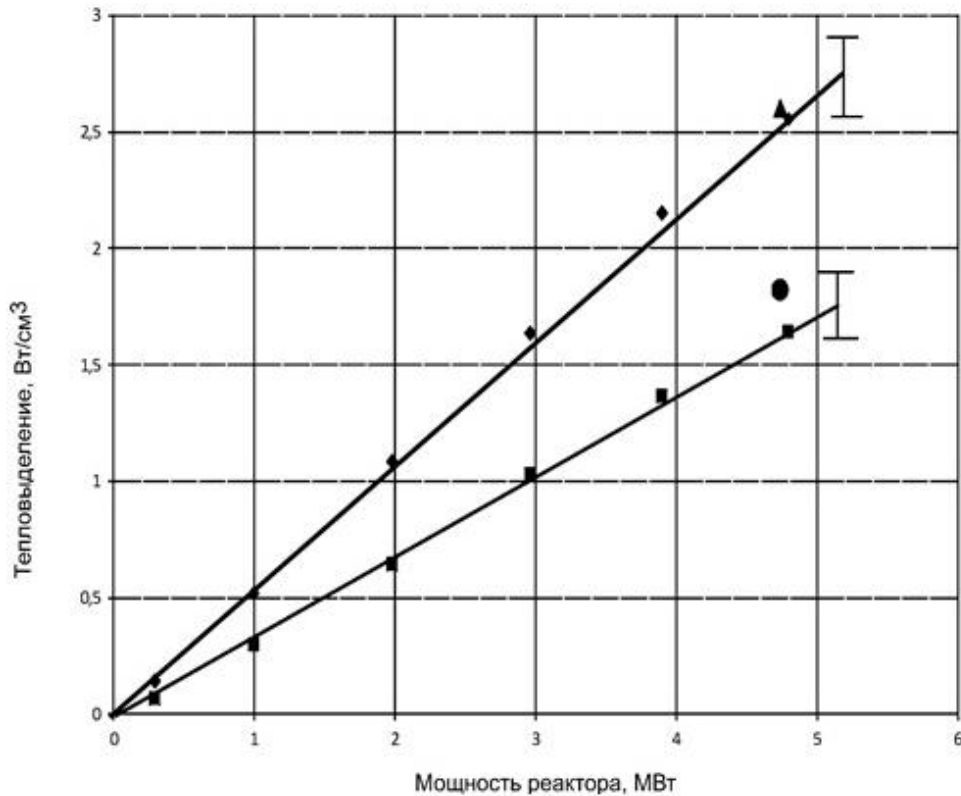


Рисунок 4.4 - Результаты определения энерговыделения в образцах по показаниям термопар в ячейках 8-5 (нержавеющая сталь) и 8-3 (титан) для различных ступеней мощности реактора, где

- ◆ - Нестационар, 8-5, сталь, 22.06.22 ▲ - [(92)], 8-5, сталь, 27.06.22
- - Нестационар, 8-3, титан, 22.06.22 ● - [(92)], 8-3, титан, 27.06.22

В результате применения описанной выше методики были найдены величины тепловыделения в конструкционных материалах в ячейках 8-3 и 8-5 третьего ряда отражателя, которые составили для стали $0.45 \text{ Вт}/(\text{см}^3 \text{ МВт})$ и для титана - $0.35 \text{ Вт}/(\text{см}^3 \text{ МВт})$.

Погрешность определения величины энерговыделения в образцах в данном случае составляет $\sim 10\text{--}15\%$.

Значения, нормированные на единицу плотности образца и максимальной мощности реактора (эффективность ячейки), составили

- для ячейки 8-5 отражателя 0.071 ± 0.007 , Вт/ г МВт;
- для ячейки 8-3 отражателя 0.081 ± 0.008 , Вт/ г МВт.

Как показывают результаты экспериментов и расчетов, нормированное на единицу плотности материала и мощности реактора тепловыделение в конструкционных материалах в ячейке 8-3 несколько больше, чем в ячейке 8-5, что вызвано более близким расположением к центру активной зоны.

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.

4.2. Отработка расчетно-экспериментального метода определения величины инерции системы «термопара-ТВЭЛ»

4.2.1 Общие положения

Как уже было отмечено в Разделе 1.8, для получения информации об изменении температуры опытных ТВЭЛОВ в режиме реального времени их инструментуют термопарами. Корректность проводимых измерений зависит от различных факторов, существенным среди которых является качество заделки термопары на поверхности испытываемого образца.

В рамках дореакторных испытаний макетов ТВЭЛОВ был разработан расчетно-экспериментальный метод, применение которого позволяет получить значения инерции термопар, закрепленных на объекте контроля различными способами, а также суммарной инерции ТП и экспериментального макета (система «Термопара – Объект контроля»).

4.2.2. Экспериментальная составляющая метода определения инерции термопар

Для отработки предлагаемого метода определения инерции термопар был создан лабораторный стенд. На стенде проведены тепловые исследования экспериментального образца, с термопарами, закрепленными на его поверхности двумя способами.

Схема стенда приводится на Рисунке 4.5. Регистрация показаний термопар производилась при помощи мультиметра Agilent, они записывались в файл.

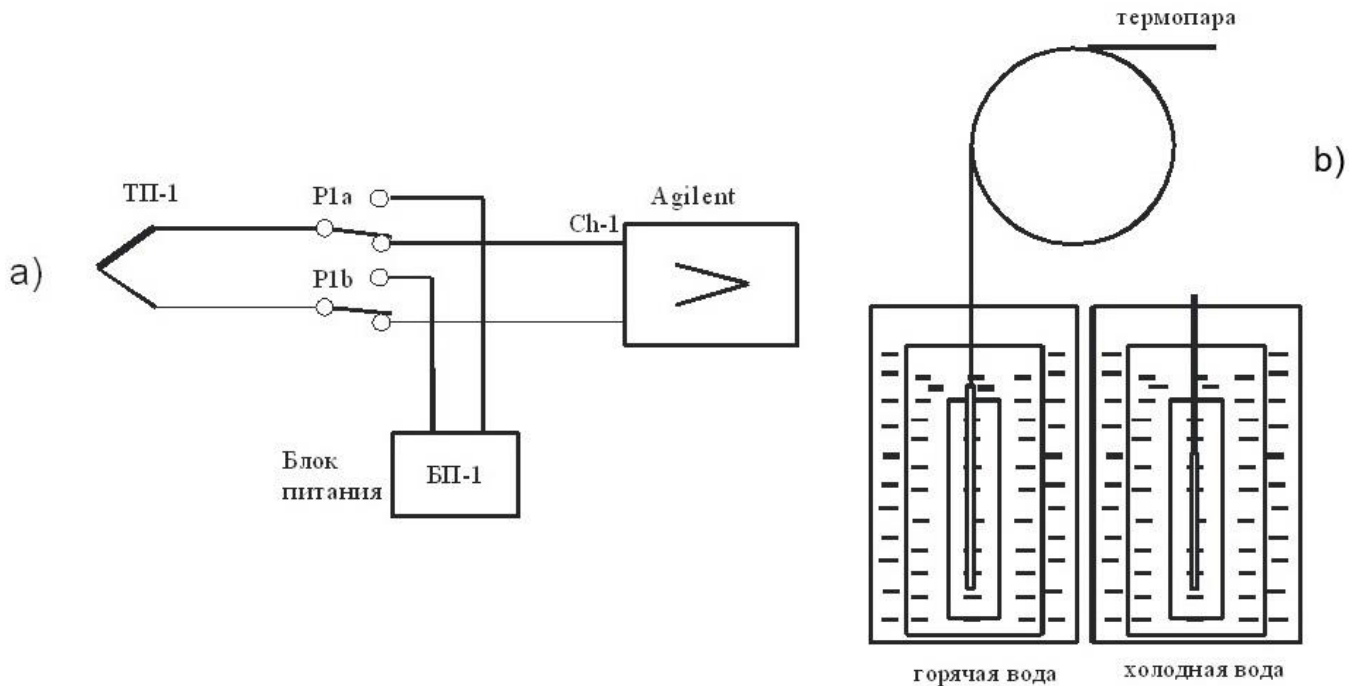


Рисунок 4.5 - Схема стенда: а) иллюстрация режима электронагрева; б) схема с переносом термопары из одних условий в другие

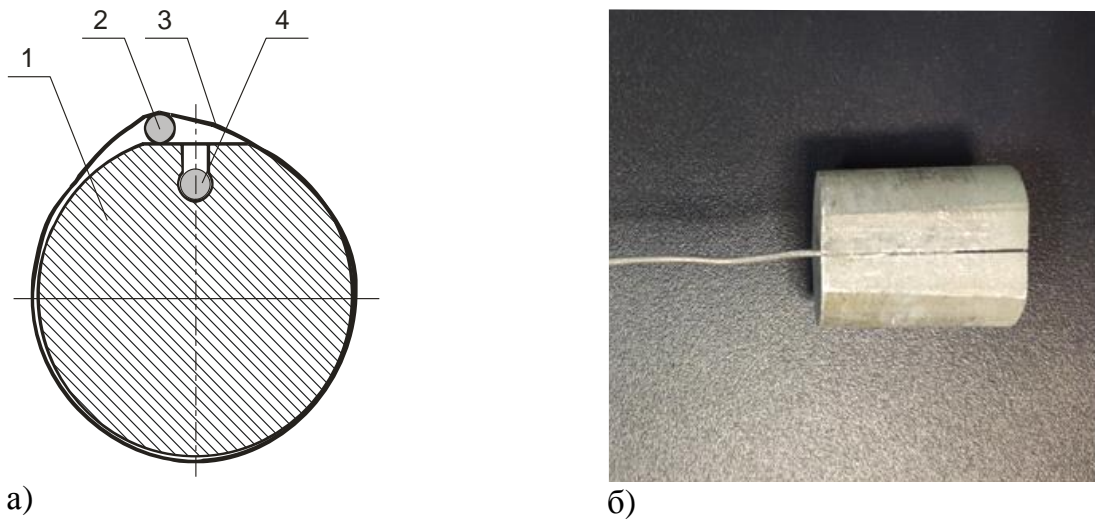
Для проведения нестационарных исследований термопар в рамках лабораторных испытаний (Рисунок 4.5) переходные процессы вызывались следующими способами:

- Перенос термопар из горячей (до 50 °С) воды в воздух (комнатной температуры);
- Перенос из воздуха в горячую воду;
- Перенос из воды с одной температурой в воду с другой температурой;
- Ступенчатый (импульсный) электронагрев одной из термопар при нахождении в воздухе или воде.

Экспериментальный образец представлял собой цилиндр из алюминия диаметром 23 мм и длиной 32 мм. С его поверхности была снята часть металла, что создало лыску вдоль всей поверхности образца. В теле образца, в точке, близкой к его поверхности, было вырезано круглое отверстие диаметром 1.05 мм с технологическим прорезом шириной 0.4 мм по всей длине образца (далее – паз). После обработки поверхность паза имела значение шероховатости R_a не более 3.2 мкм. В данном случае это существенно, потому что, как уже отмечалось, при креплении ТП необходимо добиваться максимального контакта чувствительного элемента термопары с поверхностью.

Крепление термопар к образцу производилось двумя способами: при помощи хомута и заделкой в паз. Хомут был изготовлен из нержавеющей проволоки толщиной

0.1 мм. Схема вариантов крепления термопар и внешний вид образца с ТП, заделанной в паз, приводятся на Рисунке 4.6.



Рисунке 4.6 - Экспериментальный образец: а) схема сечения образца: 1 – корпус образца; 2 - термопара, контролирующая температуру поверхности; 3 - хомут, прижимающий термопару к поверхности образца; 4 - термопара в пазу, измеряющая температуру поверхности; б) общий вид образца с установленной в паз термопарой

Для исследований использовались термопары ХА с внешним диаметром 1.0 мм и 0.35 мм (в пазу могли исследоваться только термопары с диаметром 1.0 мм). Основные параметры термопар приводятся в Таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Параметры термопар

№ ТП и наличие изоляции относительно оболочки	Для термопары в оболочке: - длина, м \\ - диаметр, мм	Сопротивление ТП, общее/хромель/алюмель, Ом
1, неизолирована	25 \ 1	929/674/259
3, неизолирована	25 \ 1	935/678/258
4, изолирована	25 \ 1	918/ ---
9, неизолирована	0.94 \ 0.35	250/178/83

На Рисунке 4.7 показаны экспериментально полученные значения собственной инерции термопар в зависимости от их внешнего диаметра, варианта исполнения, условий измерений (Таблица 4.2).

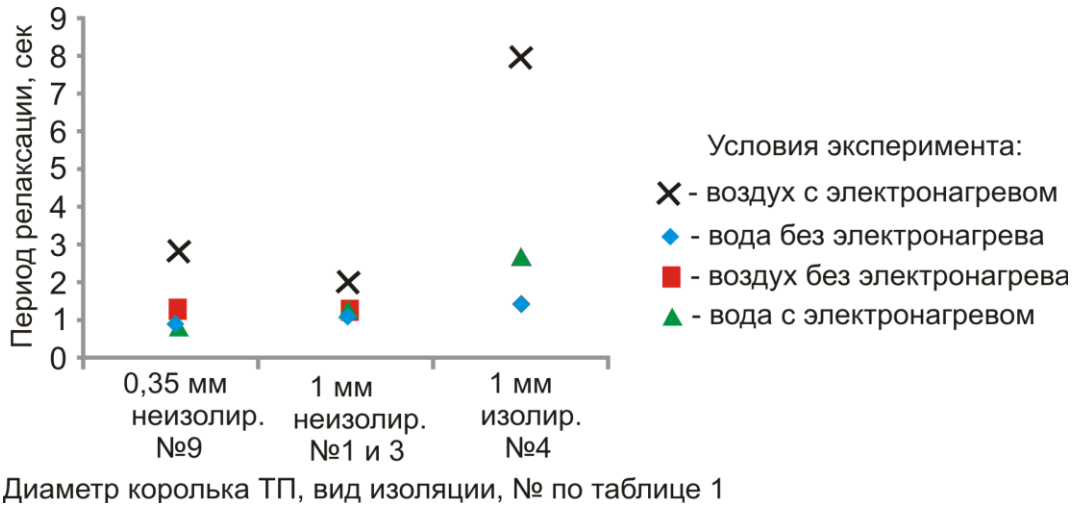


Рисунок 4.7 - Инерция термопар (период релаксации) в зависимости от их внешнего диаметра, варианта исполнения, условий измерений

Из данных, представленных на Рисунке 4.7, видно, что изолированная термопара (№4) имеет большую инерцию (период релаксации), чем другие неизолированные термопары.

Для определения собственной инерции термопар вначале проводилось исследование свободных ТП. После крепления термопары для определения ее инерции относительно образца использовался метод электронагрева. При выборе величины подаваемой мощности учитывались значения сопротивления и размеров термопар, качество заделки на образце. Для термопары №1 уровень мощности, задававшейся на источнике питания, приводится на Рисунке 4.8. Чтобы избежать повреждения термопар в процессе проверки каждое исследование начиналось с малой величины подаваемого напряжения.

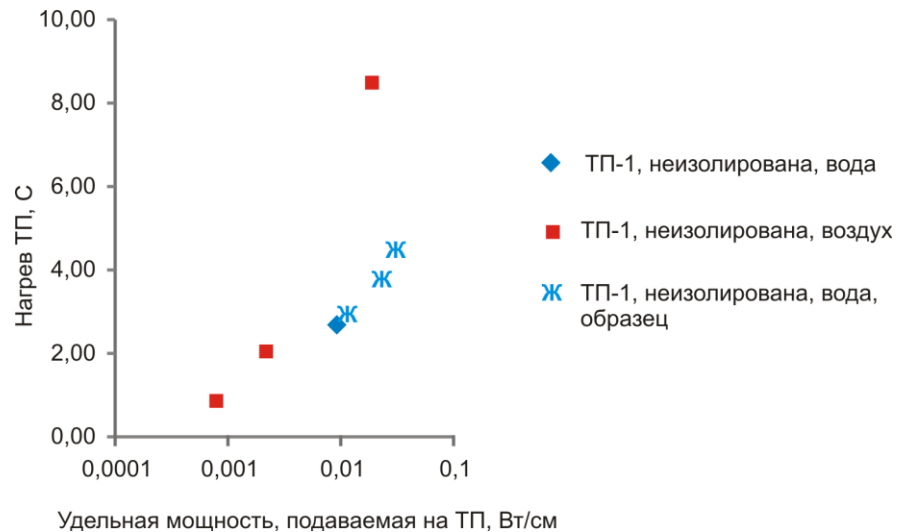


Рисунок 4.8 - Зависимость электронагрева термопары №1 от удельной мощности и внешних условий

Нужно отметить, что данные, приведенные на Рисунке 4.8, соответствуют характеристикам и размерам термопары №1 (Таблица 4.2). Для термопар с другими характеристиками значения подаваемой мощности могут отличаться. Это нужно учитывать при определении величины сигнала, подаваемого на термопару, для каждого конкретного эксперимента.

После определения инерции заделанной термопары, экспериментально находили инерцию системы «ТП-Объект контроля». Для этого макет (образец с заделанной ТП) исследовался при резком изменении температуры среды.

4.2.3. Обработка экспериментальных данных

На Рисунке 4.9 в качестве примера приводятся результаты измерения температуры в пазу образца и под хомутом при изменении температуры окружающей среды, вызванного переносом из холодного воздуха ($\sim 23^{\circ}\text{C}$) в теплую воду (до $\sim 49^{\circ}\text{C}$), с выдержкой в ней до установления стационарного состояния и последующего переноса в воду с температурой, равной $\sim 23^{\circ}\text{C}$.

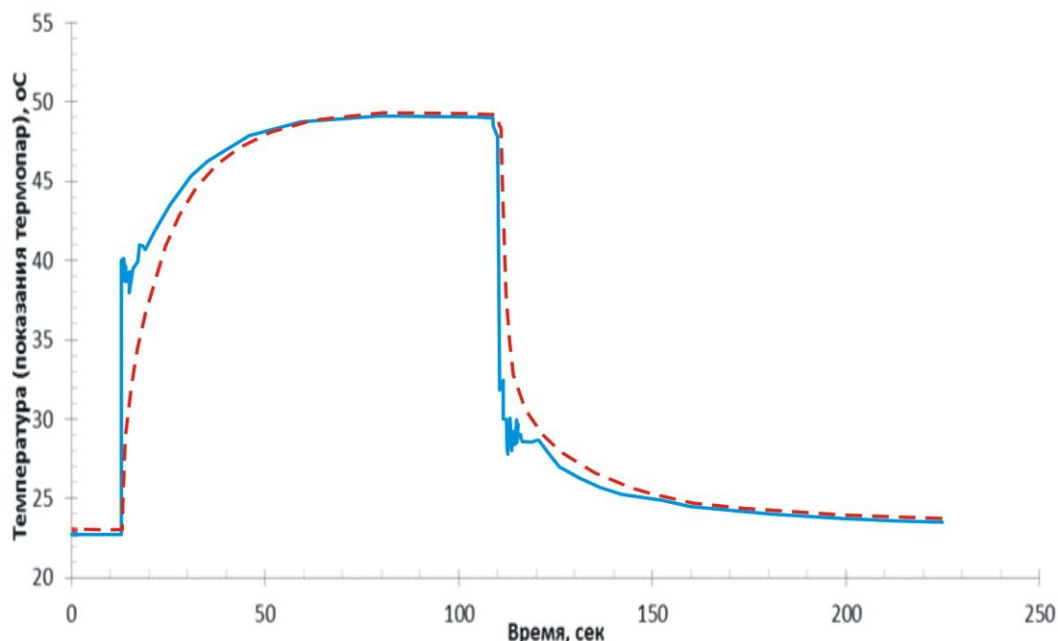


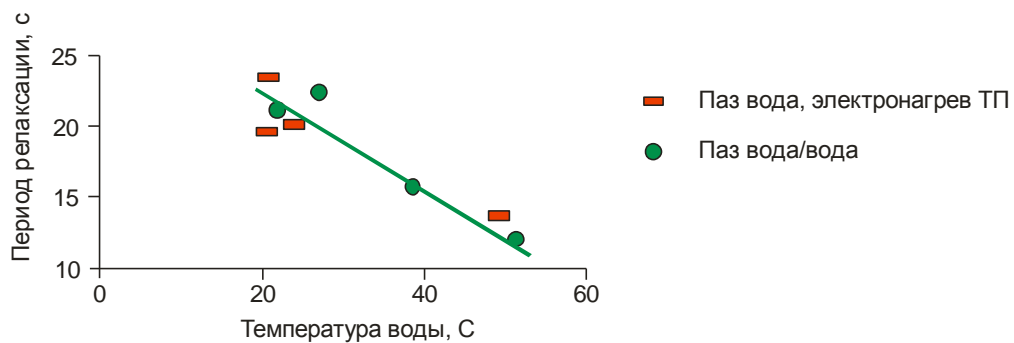
Рисунок 4.9 - Результаты измерения температуры в пазу образца и под хомутом при изменении температуры окружающей среды, где:

- показания термопары №1 под хомутом;
- - - показания термопары №4 в пазу.

Из Рисунка 4.9 видно, что график показаний термопары №4, расположенной в пазу образца, более четкий и сглаженный по сравнению с показаниями ТП №3, закрепленной при помощи хомута. Термопара, прижимаемая хомутом к поверхности макета имеет хороший тепловой контакт (сильная тепловая связь) с водой и слабую тепловую связь с образцом (по классификации работы [94]). Это определяет очень быстрый подогрев термопары до уровня $\sim 40^{\circ}\text{C}$, затем, после некоторых колебаний, термопара под хомутом начинает показывать тепловой контакт и с образцом. Таким образом, можно сделать вывод, что особую роль качество заделки термопары на поверхности образца играет при переходных процессах. На конечном этапе измерений (Рисунок 4.9) обе термопары имеют практически одинаковый период релаксации, характерный для образца в воде, составляющий в данном случае ~ 13 с (Рисунок 4.10). Суммарная инерция образца с заделанной термопарой определялась в данном случае с использованием нестационарного метода регулярного режима. При выходе температуры на стационар показания термопар №1 и №4, согласно графику, практически совпадают.

При анализе результатов измерений, представленных на Рисунке 4.9, нужно обязательно учитывать, что в данном случае отсутствует тепловыделение в самом образце, и его температура главным образом определяется условиями среды.

Расчитанные при помощи метода регулярного теплового режима значения суммарной инерции образца с термопарой, заделанной в паз, а также значения собственной инерции ТП показаны на Рисунке 4.10. (Погрешности в данном случае могут быть связаны, как с особенностями проведения эксперимента, так и с расчетным определением значения инерции.)



Рисунке 4.10 - Зависимость суммарной инерции образца с термопарой, заделанной в паз, и значений собственной инерции ТП от условий испытаний

На Рисунке 4.10 приводятся результаты экспериментального измерения периода релаксации термопар для следующих основных вариантов исследований:

- 1) Термопары в пазу образца (общее тепловое возмущение задавалось переносом макета из воды с одной температурой в другую воду);
- 2) Термопары в пазу образца предварительно выдерживались в воздухе или в воде до наступления стационарного состояния (тепловое возмущение задавалось только электронагревом термопар).

Для второго варианта исследований, когда тепловое возмущение задавалось только электронагревом термопар, определяющий вклад в их инерцию вносил тепловой контакт ТП с образцом. При хорошем контакте с поверхностью термопара показывала инерцию образца, при плохом контакте стремилась к собственной инерции.

Описанный выше порядок измерений и контроля тепловой связи термопары с поверхностью образца может использоваться и при проведении других, аналогичных исследований.

4.2.4. Описание аналитической модели для определения погрешности при измерениях температуры образца

Была разработана расчетная модель, позволяющая оценивать значения температурного поля термопары и инерции системы «ТП – Объект контроля» с использованием аналитического решения и при варьировании входных параметров. Применение предлагаемой расчетной модели позволит давать «более гибкую» (по сравнению с экспериментальной) предварительную оценку процессов, происходящих в термопаре, в зависимости от входных параметров, а также проводить моделирование для большего числа возможных вариантов сочетаний характеристик ТП и образцов при планировании будущих экспериментов.

В модели для нахождения скорости изменения температуры термопары было использовано приводимое в работах [108, 94, 109] решение для цилиндра с изменяющейся температурой внешней среды при граничных условиях третьего рода. Рассматривался частный случай, когда температура окружающей среды (в данном случае – экспериментальный образец) изменяется по закону $u = (v_0) * [1 - e^{(-v^2 * F_0)}]$ на некоторую величину v_0 . Мощность внутренних источников тепла в ТП не меняется.

В результате преобразований было найдено следующее решение (условие возможности такого решения можно записать в виде: $v^2 \ll \mu_n^2$):

$$T(F_0) = (v_0) * [1 - e^{(-v^2 * F_0)}] - (v_0) * \sum_{n=1}^{\infty} A_n * J_0(\mu_n * R) * \frac{v^2}{(\mu_n)^2} * [e^{(-v^2 * F_0)} - e^{-(\mu_n)^2 * F_0}] \quad (4.10)$$

где F_0 – число Фурье;

v – параметр, отвечающий за влияние внешней среды;

$$A_n = \frac{2 \cdot J_1(\mu_n)}{\mu_n \cdot [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} \text{ при } \tau_0 > \tau_1 > \tau_2 \dots \tau_n;$$

J_0 и J_1 – функции Бесселя первого рода, соответственно нулевого и первого порядка;

μ_n – корни уравнения $J_0(\mu_n) / J_1(\mu_n) = \mu_n / Bi$, где Bi – число Био;

$$\mu_{n=1}^2 = \frac{R_0^2 m/n}{a \cdot \tau_{n=1}}$$

a – коэффициент температуропроводности ТП;

R – безразмерная переменная, характеризующая положение исследуемой точки внутри

ТП относительно величины внешнего радиуса.

Значение безразмерного параметра R находится как:

$$R = \frac{r}{R_0},$$

где r – переменная по радиусу ТП;

R_0 – величина внешнего радиуса ТП.

«Первая» часть уравнения (4.10) описывает экспоненциальное изменение температуры образца, учитывающее величину инерционности образца, которая должна быть определена экспериментально. «Вторая» часть уравнения (4.10) описывает относительное изменение температуры T термопары на единицу градуса в зависимости от времени τ . Таким образом, $T(\tau)$ характеризует «отставание» показаний ТП от температуры объекта контроля. При анализе полученного графика $T(\tau)$ можно определить соответствующее максимальное отставание. Скорость убывания $T(\tau)$ характеризует инерционность системы «Термопара-Объект контроля».

После ряда проведенных преобразований уравнения (4.10) для $T(R, \tau)$ было получено следующее выражение (для расчета отставания показаний термопары от температуры образца в относительном виде), которое использовалось при проведении последующих расчетов:

$$T(R, \tau)/\vartheta_0 = \sum_{n=1}^6 A_n J_0(\mu_n R) \frac{\tau_n}{t_0 - \tau_n} (e^{-\frac{\tau}{t_0}} - e^{-\frac{\tau}{\tau_n}}) \quad (4.11)$$

где τ – время основного процесса в твэле и в ТП;

τ_n – экспериментально определенная инерция термопары, закрепленной на образце;

t_0 - инерция макета, определенная экспериментально.

В качестве ограничений возможности использования формулы (4.11) нужно отметить, что в такой форме она может применяться только для расчета при нагреве образца и, как уже отмечалось, для случая, когда термопара окружена единой средой.

С целью оптимизации процесса расчетов на основе разработанной модели была написана соответствующая программа в системе MathCad, которая позволяет получать оценки инерционности системы «ТП – Объект контроля» при варьировании входных

параметров термопары и образца, на котором она закреплена. Использование данной программы позволяет получить сравнение большего числа возможных вариантов для моделирования с учетом входных данных

После определения входных параметров, в программе рассчитывается значение первого корня μ_1 уравнения $J_0(\mu) / J_1(\mu) = \mu / Bi$ при заданных значениях внешнего радиуса ТП R_0 и экспериментальном значении инерции ТП (τ_n). По рассчитанному значению μ_1 находим другие корни уравнения при $n=1..6$, с использованием данных известных таблиц [109].

Нужно отметить, что предлагаемое решение условно рассматривает исследуемую термопару, как цилиндр. При этом, практическая реализация многих из возможных вариантов заделки ТП на оболочке опытного твэла приводит к изменению профиля сечения рабочего конца термопары (описано в Разделе 1.8). Это обстоятельство нужно принимать во внимание при оценке точности результатов расчетов.

4.2.5. Апробация и верификация предложенной аналитической модели

Для апробации предложенной расчетной модели в качестве примера были рассмотрены варианты комбинаций значений инерции термопары и исследуемого образца, основанные на экспериментальных данных, представленных на Рисунке 4.10.

Расчеты проводились для способа заделки термопары в паз, когда ТП «полностью» погружена в образец, который в таком случае является для ТП внешней средой. Радиус исследуемой термопары $R_0 = 0.5$ мм.

На Рисунке 4.11 приводятся результаты расчета для случая, когда нестационарный процесс для термопары, заделанной в паз, вызывается переносом из воды с одной температурой в воду с другой температурой. Качество заделки термопары в данном случае довольно хорошее. Значения выбранных входных параметров для расчета представлены в Таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Входные параметры расчета

Параметры	Вариант 1	Вариант 2
$\tau_{n=1}$, сек	20	19
t_0 , сек	23	21

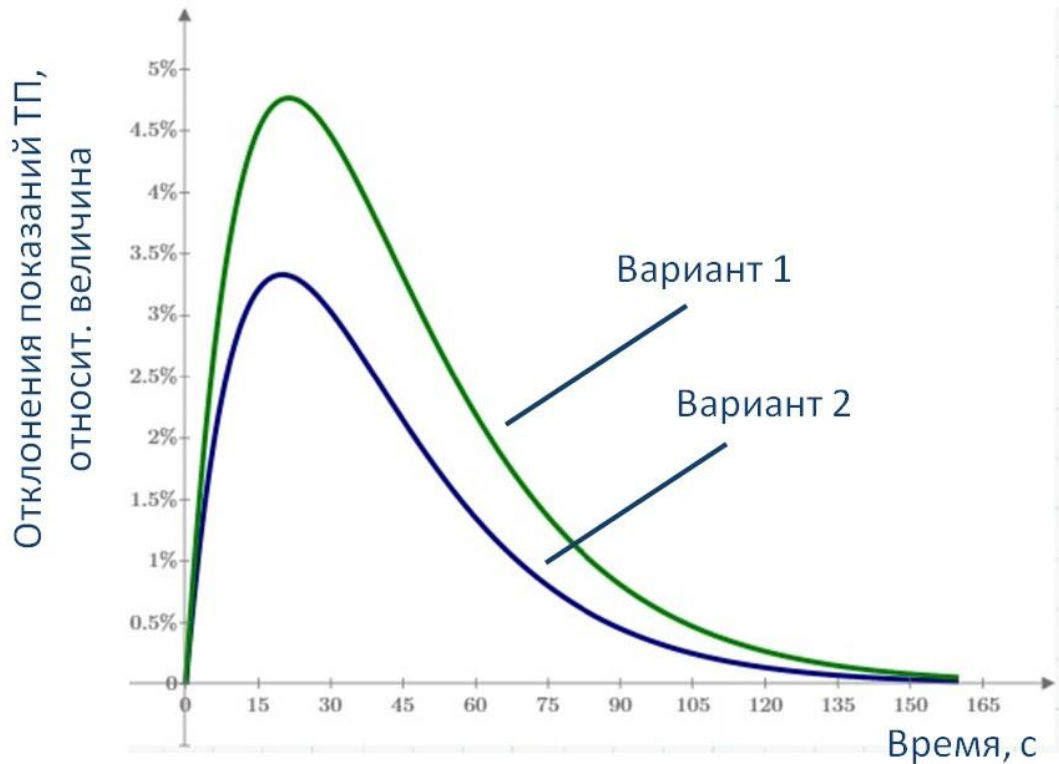


Рисунок 4.11 Отклонение показаний термопары от реальной температуры образца для Вариантов 1 и 2

На Рисунке 4.11 показано максимальное отклонение показаний термопары от температуры образца за время переходного процесса для вариантов, приведенных в Таблице 4.3. Из графика на Рисунке 4.11 видно, что по результатам расчета для Варианта 2 отклонение показаний термопары от реальной температуры образца меньше, чем для Варианта 1, что согласуется с данными, полученными в эксперименте (Рисунок 4.11).

4.3. Комплексный подход к выбору способа инструментации опытных ТВЭЛов для проведения реакторных экспериментов

Проведенный в настоящей работе анализ показывает, что при выборе способа оснащения термопарами испытываемого ТВЭЛа необходимо в комплексе учитывать всю совокупность факторов, которые могут повлиять на точность и качество измерения температуры в условиях конкретного реакторного эксперимента. Систематизация данных факторов позволила сформулировать основные составляющие комплексного подхода для выбора наиболее оптимального способа инструментации ТВЭЛов, испытываемых в ампульных устройствах.

Исходные данные и основные задачи, которые надо решить при практической реализации такого комплексного подхода в процессе подготовки реакторных экспериментов по исследованию инструментированных ТВЭЛов в АУ представлены ниже.

Исходные данные:

- Характеристики исследуемых опытных ТВЭЛов;
- Характеристики термопар, которые возможно использовать в предстоящем эксперименте;
- Параметров теплоносителя в ампульном устройстве для испытываемых ТВЭЛов в планируемом эксперименте;
- Количество ТП, которые требуется закрепить на оболочке ТВЭЛа, а также предполагаемые места их крепления.

Задачи, требующие решения при реализации комплексного подхода по выбору способа инструментации опытных ТВЭЛов

- Предварительная оценка возможного влияния заделки и размещения ТП на движение теплоносителя в ограниченном объеме ампульного устройства (в случае охлаждения опытного ТВЭЛа в условиях естественной конвекции);
- Оценка ресурса термопар, которые планируется использовать, исходя из длительности планируемого эксперимента;
- Предварительный выбор возможных способов заделки ТП на оболочке ТВЭЛа;

- Получение экспериментальных данных об инерции ТП, экспериментального образца и о качестве их заделки на образцах твэлов;
- Проведение расчетов температурного поля термопар и инерции системы «ТП-твэл» с использованием аналитической модели;
- Соотнесение полученных оценок для выбранного способа инструментации опытного твэла с результатами теплогидравлических и прочностных расчетов, которые проводятся в рамках обоснования планируемого реакторного эксперимента;
- Комплексный анализ результатов, полученных на предыдущих этапах, и принятие решения о выборе оптимального способа контроля температуры опытного твэла, позволяющего обеспечить необходимую точность и надежность измерений в условиях конкретного эксперимента;
- Определение возможных погрешностей измерений при выбранном способе инструментации опытного твэла для последующего их учета при анализе полученных в реакторном эксперименте данных.

Предложенный комплексный подход может быть использован в рамках подготовки ампульных испытаний на реакторе ИР-8 инструментированных опытных твэлов для получения представительных экспериментальных данных по изменению температуры.

Заключение по разделу 4

Проведена отработка методов контроля параметров опытных твэлов (таких как энерговыделение, температура) при реакторных испытаниях.

Отработан подход к оперативному контролю величины энерговыделения в цилиндрических образцах нестационарным методом регулярного теплового режима. Показана возможность использования нестационарного метода регулярного теплового режима для экспериментального определения величины энерговыделения в образцах (в том числе, в сердечниках опытных твэлов и имитаторов твэлов при их испытаниях в АУ-СКД). Экспериментально подтверждено существование «критического» радиуса при цилиндрической геометрии образца.

В качестве преимуществ рассмотренного метода регулярного режима (с установкой термопары в «критическом» радиусе) можно отметить относительную простоту и быстроту определения величины энерговыделения в образцах по полученным экспериментальным данным. Предложенный метод может быть использован как самостоятельно для оперативных оценок экспериментальных параметров образцов, так и служить дополнением к другим расчетным подходам определения энерговыделения в конструкционных материалах.

При установке термопар в сердечнике из вольфрама можно получить в процессе реакторного эксперимента чрезвычайно важные данные для экспресс-оценки уровня энерговыделения в имитаторе твэла. Знание величины энерговыделения в образцах в данном случае важно для корректности проведения теплогидравлических расчетов.

Выбор места установки термопар в сердечнике стоит проводить, учитывая положение «критической» точки цилиндра, нестационарный тепловой процесс в которой проходит только в регулярной форме. Для имитатора твэла особенно представительными полученные данные могут быть в случае одновременной инструментации при помощи термопар как сердечника, так и оболочки испытываемого образца. Способы инструментации имитатора твэла должны быть отдельно проработаны в процессе конструирования АУ с учетом результатов тепловых расчетов.

Помимо возможности проведения экспресс-контроля за параметрами облучения в процессе эксперимента данные таких исследований могут использоваться для верификации расчетных моделей, описывающих поведение образцов при их испытаниях в ампульных устройствах.

В рамках обеспечения корректного измерения температуры образцов 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.

Для отработки предлагаемого метода определения инерции создан специальный лабораторный стенд, на котором были получены экспериментальные значения для термопар, закрепленных на поверхности образца двумя способами. Приведено описание и результаты апробации аналитической модели для определения погрешности

измерений температуры образца при помощи термопар. Рассмотрены возможности использования разработанного расчетно-экспериментального метода при подготовке реакторных исследований опытных твэлов, которые планируется испытывать на реакторе ИР-8 с использованием ампульных устройств.

Анализ и систематизация факторов, влияющих на корректность измерения температуры оболочек твэлов в процессе испытаний, позволили сформулировать основные положения комплексного подхода для выбора наиболее оптимального способа инструментации твэлов термопарами. Такой подход рекомендуется использовать при подготовке экспериментов с опытными твэлами на реакторе ИР-8.

5. Расчеты внутритвэльных процессов как часть обоснования испытаний опытных твэлов на реакторе ИР-8 (в том числе, инструментированных)

5.1. Схема моделирования процессов внутри твэла при его облучении в АУ в реакторе ИР-8

Для обоснования возможности проведения при заданных параметрах испытаний в ИР-8 опытных твэлов в ампульном устройстве выбранной конструкции должны быть выполнены нейтронно-физические, теплофизические, прочностные и твэльные расчеты. При выборе параметров и конструкции инструментированного твэла, по сути, происходит его проектирование. В данном случае при планировании испытаний необходимо проведение оценок динамики процессов в твэле под облучением. Для таких твэлов должны быть получены, в частности, оценки изменения максимальной температуры топлива. Оценка динамики изменения внутреннего давления в опытном твэле может дать дополнительную информацию для проведения прочностных оценок. При планировании относительно длительных испытаний опытных твэлов, наряду с другими вопросами, нужно также принимать во внимание возможное изменение геометрических размеров твэлов в процессе их исследований под облучением, учитывая ограниченный объем ампульного устройства. Такие оценки могут быть сделаны с использованием специальных программ или твэльных кодов.

Схема взаимосвязи расчетных обоснований и получения данных представлена на Рисунке 5.1.

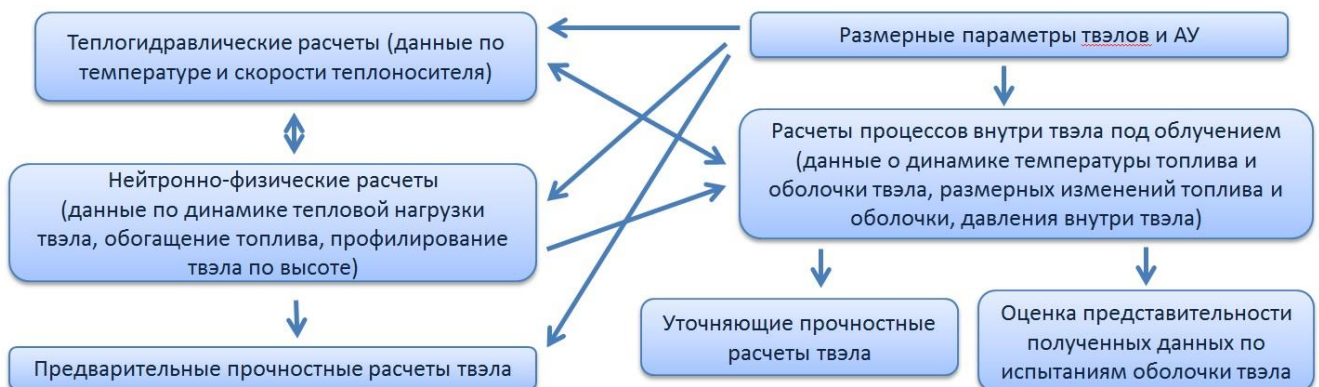


Рисунок 5.1. – Схема получения расчетных данных о параметрах опытного твэла, испытываемого в ампульном устройстве

В данной главе показана отработка способа моделирования процессов внутри твэлов при их облучении в АУ в реакторе ИР-8. Моделирование проводилось на примере твэлов для проектируемого реактора ВВЭР-СКД (в том числе, и инструментированных твэлов) и твэлов толерантного типа, испытания которых рассматриваются в числе актуальных исследований на реакторе ИР-8. Ранее оценки параметров инструментированных твэлов инновационных ВВЭР не были интегрированы в схему расчетных обоснований, проведение которых необходимо при планировании испытаний опытных твэлов на ИР-8 в ампульном устройстве.

5.2. Оработка способа моделирования процессов внутри твэла с использованием разработанной программы SOTAR

5.2.1. Адаптация SOTAR для расчетов процессов в твэлах инновационных ВВЭР

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 программе SOTAR с данными испытаний твэлов в рамках советско-финской исследовательской программы СОФИТ («Исследование в реакторе МР топлива типа ВВЭР»). В частности, использовались данные этапа СОФИТ 1.1. (1985 – 1986 годы), в рамках которого проводилось облучение опытной ТВС, состоящей из 18-ти твэлов. Шесть испытываемых твэлов были инструментированы термопарами. [23, 100]

Результаты сравнения расчёта в программе SOTAR центральной температуры топлива твэла № 3 с экспериментальными данными СОФИТ приведены на Рисунке 5.2. Данные для твэла № 3, инструментированного центральной термопарой, который облучался в составе опытной ТВС, были многократно опубликованы [111, 23, 100]. Проведенное сопоставление показывает хорошие результаты согласования результатов расчета и экспериментальных данных.

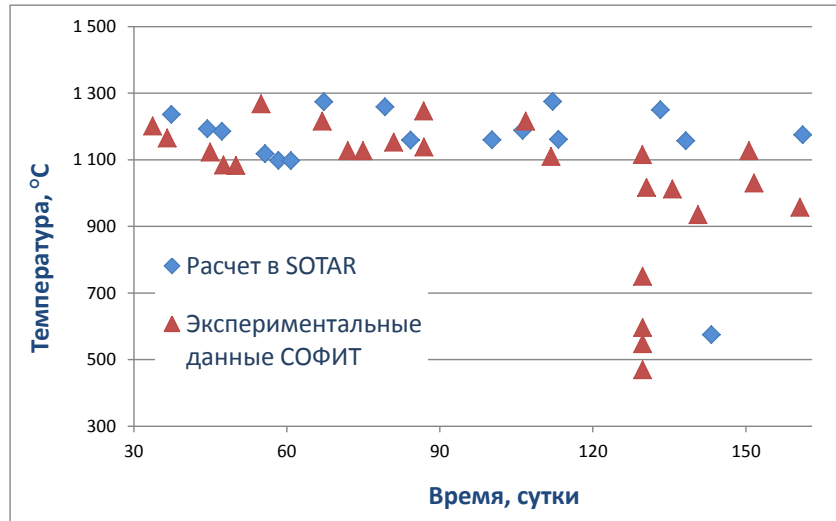


Рисунок 5.2 - Изменение центральной температуры топлива твэла №3 (оболочка из сплава Э-110, зазор равен 210 мкм и заполнен гелием) для интервала облучения 30 – 160 суток (сравнение расчета в программе SOTAR с экспериментальными данными СОФИТ)

Для твэлов усовершенствованной конструкции, к числу которых относятся, в частности, и твэлы толерантного типа, и твэлы для реактора ВВЭР-СКД, необходимо проведение комплекса расчетных обоснований. При необходимости моделирования поведения в процессе эксплуатации твэлов, изготовленных из материалов, для которых еще не накоплен опыт работы в условиях реакторного облучения, возможно проведение кросс-верификационных расчетов с использованием различных программ. В рамках работ по верификации программы SOTAR такое моделирование было проведено для твэла толерантного типа с сердечником из диоксида урана с оболочкой из FeCrAl, который в ряде исследований рассматривается в качестве одного из кандидатных материалов оболочек для ATF-твэлов [32, 49]. Твэл с оболочкой из FeCrAl был выбран в данном случае потому, что по моделированию испытаний такого твэла опубликованы результаты исследований, проводившихся в рамках деятельности Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) [32]. Сравнение результатов, полученных при использовании SOTAR, с данными [32, 111] позволило провести частичную верификацию программы.

В программе SOTAR имеется возможность задания различных свойств оболочек цилиндрических твэлов. При адаптации SOTAR для моделирования поведения опытных

АТФ-ТВЭЛОВ были внесены изменения и усовершенствования в подпрограммы для расчёта процессов в оболочках, с учётом свойств и моделей, описывающих поведение кандидатных материалов оболочек толерантных ТВЭЛОВ. Работа проведена для оболочек из FeCrAl с использованием данных и моделей из [32, 111]. Были изменены соответствующие подпрограммы, моделирующие радиационный рост, ползучесть и окисление оболочек ТВЭЛОВ, а также части основной программы SOTAR. Использовались свойства FeCrAl [32] из Таблицы 5.1.

Таблица 5.1 - Свойства FeCrAl, использовавшиеся при проведении расчетов

Температура, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/м*К	Предел текучести, МПа	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Коэффициент термического расширения, 1/°С
41	11	440	198869	0,2695862	1,850E-05
178	13	375	197228	0,2748607	1,852E-05
358	16	300	191956	0,2817907	1,858E-05
538	19	220	183146	0,2887207	1,867E-05
718	22	70	170798	0,2956507	1,879E-05
898	25	45	154912	0,3025807	1,901E-05

В механизме радиационного роста выбранного материала оболочки важную роль играет изотропия структуры FeCrAl. Поэтому, в отличие от анизотропных материалов, таких как Циркалой-4, которые не подвержены радиационному набуханию, для FeCrAl вклад аксиальной составляющей радиационного роста является несущественным. Это учитывалось при моделировании. Для оценок набухания FeCrAl (сплав С35М) был предложен предварительный подход, согласно которому используется верхний предел скорости набухания, равный 0,05% на с.н.а. При переводном коэффициенте $1 \cdot 10^{25} \text{ н/м}^2 = 0.9 \text{ с.н.а}$ интеграция по времени приводит к следующей корреляции для объемной деформации набухания [(32), (111)]:

$$\varepsilon = 4.5 * 10^{-31} * \phi \quad (5.1)$$

где ϕ – флюенс быстрых нейтронов.

Согласно данным [32, 111], скорость ползучести оболочки из FeCrAl значительно ниже скорости ползучести оболочки из циркониевых сплавов [112]. В связи с этим, на данном этапе проведения расчётов с использованием SOTAR вклад ползучести в суммарную деформацию оболочки из FeCrAl не учитывался. При этом предполагается,

что это может оказать некоторое влияние на полученные на данном этапе расчетные результаты. Доработка подпрограммы, учитывающей влияние радиационной и температурной ползучести на поведение оболочки твэла, является предметом дальнейших исследований.

Для верификации программы SOTAR использовались материалы исследования, проведенного МАГАТЭ [32], в рамках которого организациями из разных стран с использованием различных расчётных кодов выполнялось моделирование характеристик твэлов с сердечниками из диоксида урана и оболочками из Циркалой-4 и FeCrAl при облучении в заданных условиях. Сравнительное расчётное исследование проводилось для случая нормальных условий эксплуатации легководных реакторов. При моделировании рассматривался короткий твэл с типичными спецификациями для реактора PWR, облучаемый в стационарном режиме. График линейного изменения тепловыделения включал участок линейного нарастания от 0 до 25 кВт/м в течение трех часов, удержания на постоянной мощности в течение около 4 лет (~ 35000 часов), и заключительного сброса мощности в течение трех часов. Предполагалось, что твэл имеет плоский осевой профиль [32].

Основные параметры твэла с сердечником из UO_2 (без центрального отверстия) и оболочкой из FeCrAl [32], использовавшиеся в качестве исходных данных для моделирования, приведены в Таблице 5.2. Уплотнение топлива в данном случае задавалось равным 0,5 %, что согласуется с данными для топлива реакторов типа PWR [24].

Таблица 5.2. - Параметры толерантного твэла

Название параметра	Значение
Длина топливного столба, мм	118,6
Внешний диаметр таблетки, мм	8,57
Ширина радиального зазора, мкм	80
Внутренний диаметр оболочки, мм	8,73
Толщина оболочки, мм	0,385
Наружный диаметр оболочки, мм	9,5
Начальное давление газа в твэле, МПа	2
Первоначальный заполняющий газ	He
Начальная плотность топлива (%TD)	95
Компенсационный объем, см ³	1,62

Результаты расчётов изменения центральной температуры топлива и внутреннего давления для твэлов с оболочкой из FeCrAl, проведенных по программе SOTAR для выгораний до ~ 35 МВт сут/кг (что соответствует облучению в течение ~ 17000 часов), представлены на Рисунках 5.3 – 5.4. Результаты расчета с использованием SOTAR выгорания топлива толерантного твэла приведены на Рисунке 5.5.

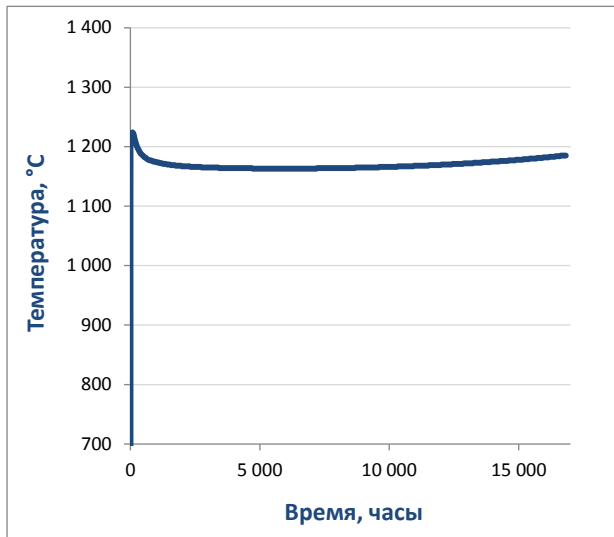


Рисунок 5.3 - Изменение центральной температуры топлива ATF-твэла

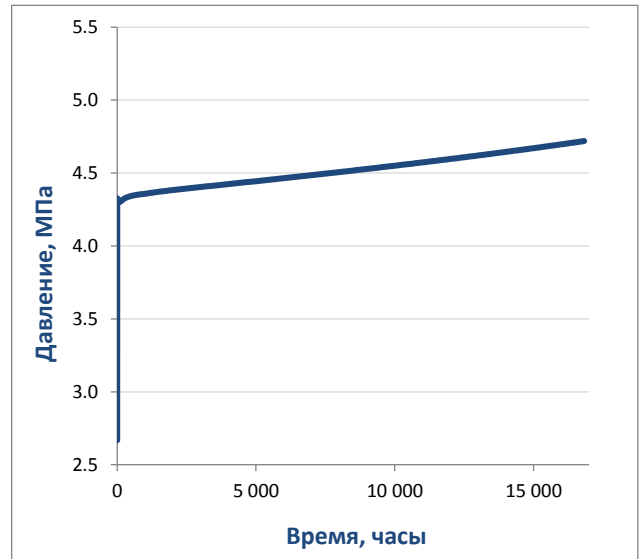


Рисунок 5.4 - Изменение внутреннего давления в ATF-твэле

Разброс значений центральной температуры топлива, рассчитанных в рамках исследования МАГАТЭ с использованием кодов BISON, FEMAXI-7, TRANSURANUS, FRAPCON-USP, BACO для толерантного твэла с параметрами, приведенными в Таблице 2, на начальных этапах облучения составляет ~ 100 градусов ($\sim 1030 - 1130$ °C), на более поздних этапах наблюдаются более значительные различия (разброс достигает ~ 200 градусов) [32]. Несколько повышенные значения центральной температуры топлива, полученные с помощью программы SOTAR (Рисунок 5.3), по сравнению с расчетами, проведенными с использованием других кодов, могут объясняться, в частности, отсутствием на данном этапе учета вклада ползучести. До возникновения взаимодействия топлива с оболочкой ползучесть вызывает направленную вовнутрь деформацию под внешним (превышающим внутреннее) давлением теплоносителя. Таким образом, не учет вклада ползучести может привести к несколько завышенным значениям величины зазора между топливом и оболочкой твэла, и как следствие, к возникновению дополнительного сопротивления и повышению расчетной температуры.

При этом можно сделать вывод, что в целом сравнение результатов, полученных с использованием программы SOTAR для аналогичных оценок изменения параметров твэлов с UO_2 и оболочками из FeCrAl (в частности, по параметрам изменения центральной температуры топлива и внутреннего давления в твэле) показывают довольно приемлемое согласование при выгораниях до ~ 35 МВт сут/кг с результатами расчётов, приведенными в [32, 111]. Отличия от расчетных результатов, полученных по разным кодам, составляют $\sim 50 - 150$ градусов.



Рисунок 5.5 - Выгорание топлива в ATF-твэле

Учитывая результаты, описанные выше, с использованием программы SOTAR было проведено моделирование поведения толерантного твэла для возможных условий его облучения в реакторе ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт».

Также была проведена адаптация программы SOTAR для моделирования поведения опытных твэлов проектируемого реактора ВВЭР-СКД. В данном случае использовались свойства стали ЧС-68-ИД х.д. (в частности, коэффициент теплопроводности, предел текучести, коэффициент линейного термического расширения) [113, 114]. Важно отметить, что коэффициент линейного термического расширения стали ЧС-68-ИД х.д. в несколько раз превышает его значения для оболочки твэлов эксплуатируемых ВВЭР из сплава Э-110 [115].

На данном этапе работ моделировался случай испытаний в АУ-СКД опытного твэла со свежим топливом, для которого не проводилось предварительное облучение в быстром исследовательском реакторе. Предполагалось, что подогревающий твэл также будет из свежего топлива. Рассматривалось облучение твэлов в течение ~ 7800 часов. В данном случае дозы на оболочках твэлов не должны превысить 2 СНА. Согласно данным [113, 116], при таких значениях повреждающей дозы для стали ЧС-68-ИД х.д. можно не учитывать вклад радиационного распухания и ползучести в формоизменение оболочки. На основании результатов исследований [117] предполагается, что вклад внутритвэльной коррозии также должен быть в данном случае незначительным.

Модели, учитывающие коррозию оболочек твэлов под воздействием среды СКД-теплоносителя, должны быть получены в рамках дальнейших исследований с учетом экспериментальных данных стендовых дореакторных и верификационных реакторных испытаний. Поэтому представляется, что разработка подпрограммы в SOTAR для определения влияния коррозии на внешнюю поверхность оболочки может быть задачей отдельного исследования. Таким образом, на данном этапе работ не учитывалось влияние на общий результат вклада оценок изменений в оболочках твэлов, полученного в подпрограммах, моделирующих радиационное распухание, ползучесть и окисление оболочек.

5.2.2. Отработка моделирования процессов внутри твэла толерантного типа при его испытаниях в реакторе ИР-8

В данном Разделе показано моделирование с использованием программы SOTAR процессов в толерантном твэле с оболочкой из FeCrAl в процессе его облучения в реакторе ИР-8 при заданных условиях.

При моделировании предполагалось, что облучение опытного толерантного твэла, параметры которого указаны в Таблице 5.2, будет проводиться в ампульном устройстве, выбор конструкции которого основан на ранее сделанных оценках. Описание АУ приведено в Разделе 1.7.2. Необходимое охлаждение опытного твэла обеспечивается за счёт движения теплоносителя в условиях естественной конвекции.

Рассматривались следующие параметры облучения:

Длительность облучения	~ 16000 часов (~ 670 эффективных суток)
Температура оболочки твэла	350 – 360 °С
Давление в АУ	16 МПа
Эквивалентный диаметр	1,85 см
Температура теплоносителя на входе	80 °С
Скорость теплоносителя	0,4 м/с

Степень доуплотнения топлива задавалась равной 0,5 % [(24)].

С помощью программы MCU-PTR [21] для опытного твэла с заданными параметрами были проведены расчёты изменения распределения мощности по высоте испытываемого образца при облучении в ячейке 6-4 отражателя реактора ИР-8. Рассмотрен равновесный цикл работы реактора с характерными положениями стержней. Опытный твэл располагался напротив физического центра активной зоны (ФЦАЗ). Предварительно для рассматриваемой конструкции было подобрано обогащение, для которого суммарная мощность твэла при работе реактора в рабочем диапазоне мощностей 5-6 МВт составляет 3 кВт. Уровень обогащения составил 4 % масс. На Рисунке 5.6³ приведены распределения мощности участков твэла 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 с учетом компенсирования падения мощности опытного твэла вследствие выгорания пропорциональным увеличением мощности реактора для поддержания требуемых температур.

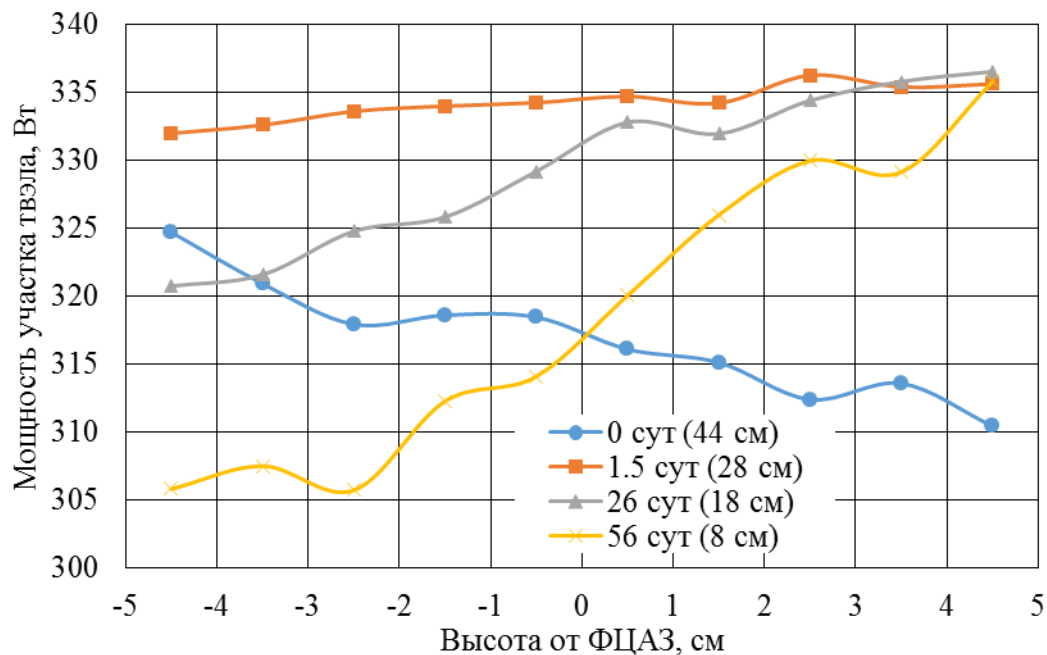


Рисунок 5.6 – Распределение мощности по высоте для различных времён облучения опытного твэла при мощности реактора 5 МВт (в скобках приведены значения погружения РО СУЗ по УП)

³ Нейтронно-физические расчёты проводились сотрудниками ЛФТИР ОРПЭЯР ОРМиТ КК НБИКС-ПТ НИЦ «Курчатовский институт»

График изменения средней по высоте линейной тепловой нагрузки опытного твэла за все время облучения приведён на Рисунке 5.7.

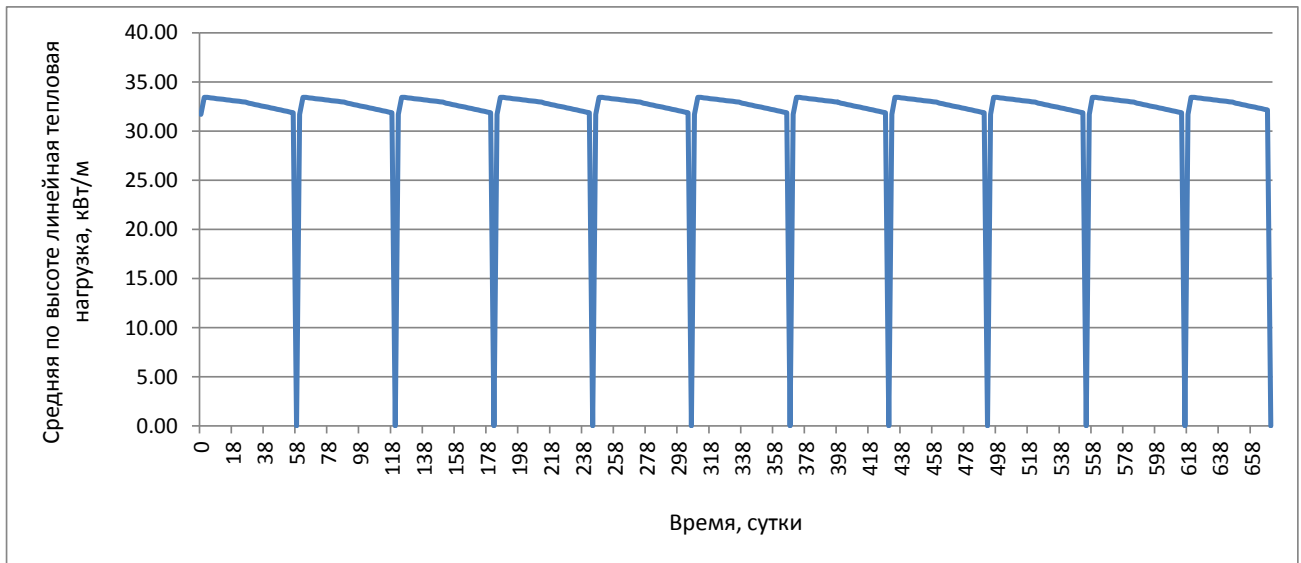


Рисунок 5.7 - Изменение средней по высоте линейной тепловой нагрузки опытного твэла

Рассмотренные выше данные использовались в качестве исходных для моделирования в программе SOTAR поведения опытного толерантного твэла при его облучении в реакторе ИР-8. Исходные данные загружались с использованием специального Excel-файла. Задаются параметры твэла (основные из которых указаны в Таблице 5.2) и его охлаждения теплоносителем. В частности, изменение линейной тепловой нагрузки, осевого профиля энерговыделения твэла, температуры теплоносителя были заданы для определенного количества шагов по времени в виде соответствующих массивов.

Полученные результаты расчётов в SOTAR опытного толерантного твэла приведены на Рисунках 5.8 - 5.10.

На Рисунке 5.8 приведён полученный с использованием программы SOTAR график изменения центральной температуры топлива от времени. Из графика видно, что полученные значения являются приемлемыми (не превышают температуру плавления). При снижении мощности реактора температура топлива также сильно уменьшается. Анализ определяемых при расчете параметров показывает, что рост температуры топлива опытного твэла в процессе его облучения объясняется, в частности, ухудшением проводимости зазора за счет выхода газообразных продуктов деления.

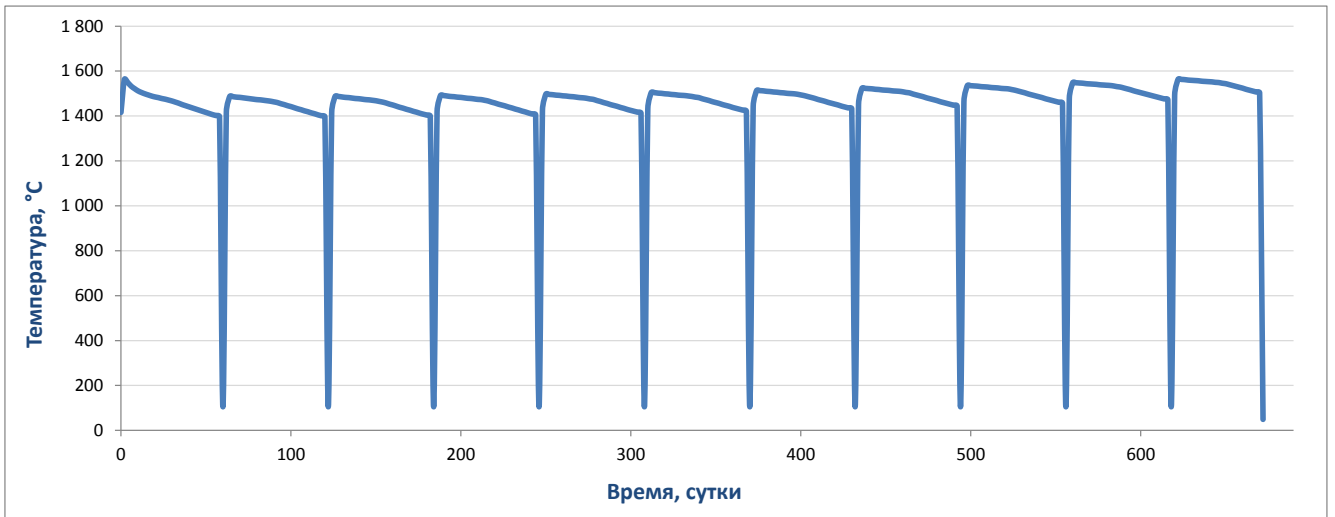


Рисунок 5.8 – Изменение центральной температуры топлива опытного ТВЭЛ (осевое положение, соответствующее средней плоскости топливного столба)

На Рисунке 5.9 приведён полученный с использованием программы SOTAR график изменения внутреннего давления в ТВЭЛ от времени облучения. График иллюстрирует тенденцию увеличения внутреннего давления в ТВЭЛ (с его периодическим уменьшением, которое соответствует снижению мощности реактора).

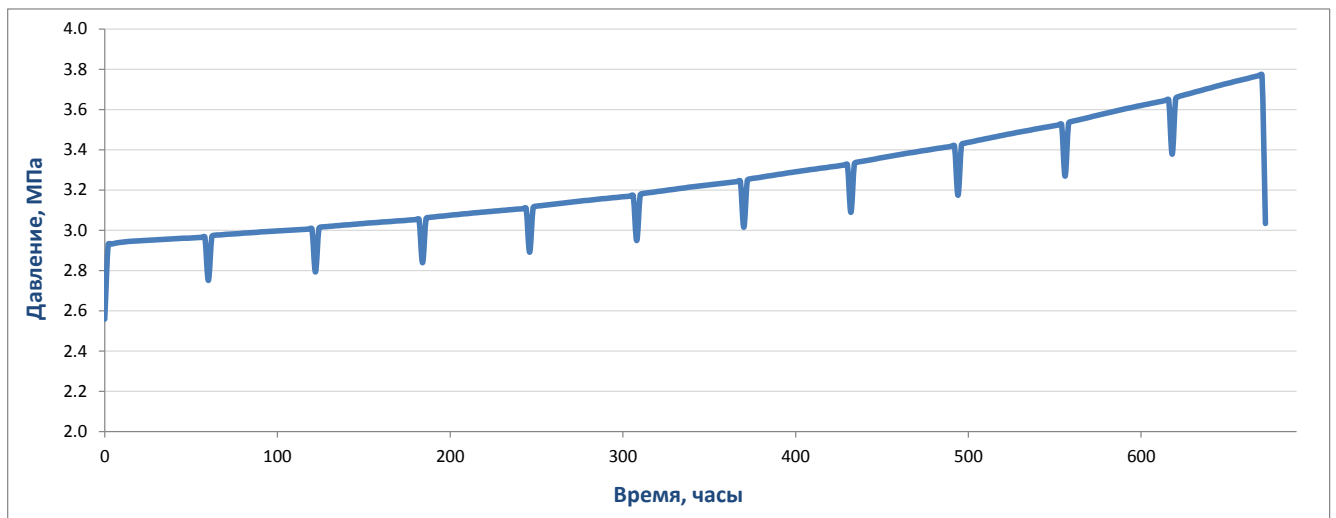


Рисунок 5.9 – Изменение внутреннего давления в опытном ТВЭЛ

Динамика температуры внешней поверхности оболочки опытного ТВЭЛ показана на Рисунке 5.10.

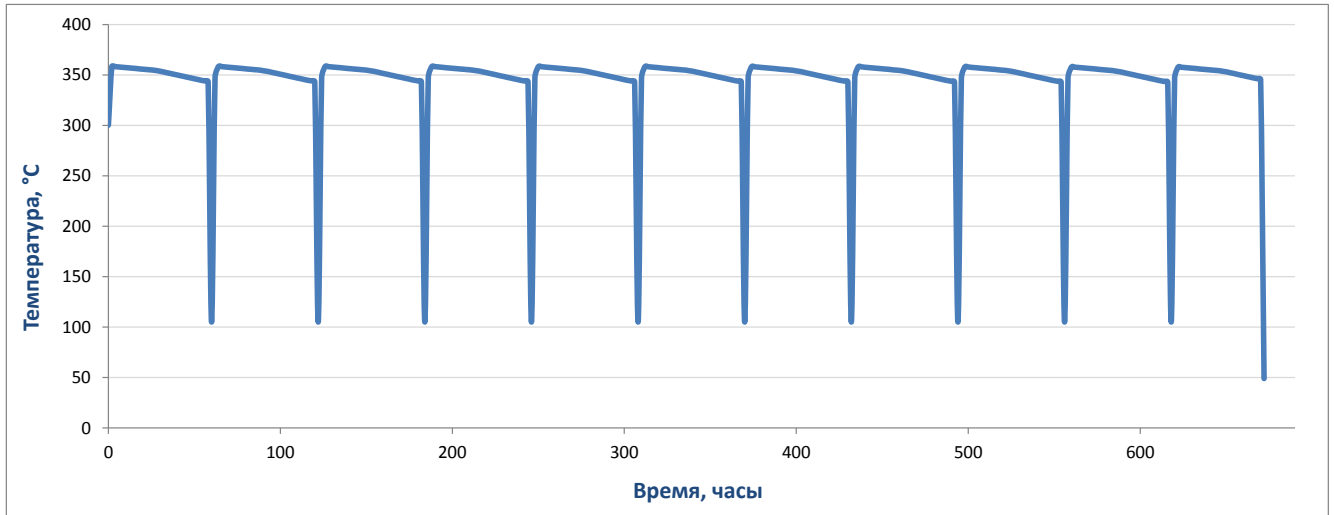


Рисунок 5.10 – Изменение температуры внешней поверхности оболочки опытного ТВЭЛ (осевое положение, соответствующее средней плоскости ТВЭЛ)

Данные, представленные на Рисунке 5.10, показывают, что в процессе облучения опытного толерантного ТВЭЛ в ампульном устройстве температуры внешней поверхности оболочки находятся на уровне ~ 350 °C, что соответствует условиям эксплуатации ТВЭЛов реакторов типа ВВЭР.

Таким образом, продемонстрирована возможность использования программы SOTAR для проведения расчётов процессов в толерантном ТВЭЛ при его испытаниях в АУ на реакторе ИР-8.

5.2.3. Отработка моделирования процессов внутри твэлов для проектируемого ВВЭР-СКД при их испытаниях в реакторе ИР-8

Рассмотрим основные этапы моделирования облучения в ИР-8 твэлов для проектируемого реактора ВВЭР-СКД. Предполагается, что облучение опытного и подогревающего (с утолщенной оболочкой) твэла проводится в ампульном устройстве, конструкция которого описана в Разделе 1.7.3.2. В качестве опытного и подогревающего твэлов рассматривались твэлы с сердечником из UO_2 и оболочкой из стали ЧС-68-ИД х.д.. Основные параметры твэлов, использовавшиеся в качестве исходных данных для моделирования, приведены в Таблице 5.3.

Таблица 5.3. - Параметры твэлов, для которых моделируется облучение в АУ-СКД

Название параметра	Значение	
	Подогревающий твэл	Опытный твэл
Длина топливного столба, мм	100	
Внешний диаметр таблетки, мм	6,6	
Ширина радиального зазора, мм	0,1	
Внутренний диаметр оболочки, мм	6,8	
Толщина оболочки, мм	2,5	0,8
Наружный диаметр оболочки, мм	11,8	8,4
Диаметр центрального отверстия, мм	1,2	
Компенсационный объем, см ³	1,93	
Начальное давление газа в твэле, МПа	2	
Первоначальный заполняющий газ	He	
Начальная плотность топлива (%TD)	96,2	
Уровень обогащения топлива, %	4,4	4,95

При моделировании предполагается, что облучение твэлов, параметры которых указаны в Таблице 5.3, будет проводиться в ампульном устройстве с разделительной трубой. Внутренний диаметр разделительной трубы 2,7 см. Необходимое охлаждение опытного твэла обеспечивается за счёт движения теплоносителя в условиях естественной конвекции.

Рассматривались следующие параметры облучения:

Длительность облучения	~ 7800 часов (~ 326 эффективных суток)
Температура оболочки опытного твэла	~ 550 °С
Давление в АУ	30 МПа
Гидравлический диаметр	
на уровне подогревающего твэла	1,52 см
на уровне опытного твэла	1,86 см
Температура теплоносителя на входе	
на уровне подогревающего твэла	170 °С
на уровне опытного твэла	190 °С
Скорость теплоносителя	0,3 - 0,35 м/с

Параметры охлаждения опытного и подогревающего твэлов задавались в виде соответствующих массивов. Используемые значения коэффициентов теплоотдачи от твэла к СКД-теплоносителю лежат в диапазоне 3000 – 4000 Вт/м²·°С. Как уже ранее отмечалось, определение параметров теплоотдачи в данном случае имеет свои особенности. Представляется, что для получения более точных оценок параметров твэлов, облучаемых в АУ-СКД, необходимо более детальное задание условий их охлаждения, учитывающее динамику изменения температур и скорости теплоносителя на различных участках циркуляционного контура. В настоящее время в рамках одного из направлений развития программы SOTAR рассматривается возможность создания отдельного модуля для взаимосвязанного учета динамики параметров СКД-теплоносителя с изменением параметров испытываемых твэлов. Представляется, что разработка такого модуля должна быть предметом отдельного исследования.

Данные по изменению мощности твэлов в процессе облучения, а также профили энерговыделения по высоте были получены в результате нейтронно-физических расчетов⁴. С помощью программы MCU-PTR [21] для подогревающего и опытного твэлов с заданными параметрами были проведены расчёты изменения распределения мощности по высоте испытываемого образца при облучении в ячейке 6-4 отражателя реактора ИР-8. Рассмотрен равновесный цикл работы реактора с характерными

⁴ Нейтронно-физические расчеты проводились сотрудниками ЛФТИР ОРПЭЯР ОРМиТ КК НБИКС-ПТ НИЦ «Курчатовский институт»

положениями стержней [118]. Соединительная часть опытного и подогревающего твэлов располагалась напротив физического центра активной зоны реактора. Предварительно для выбранной конструкции были подобраны значения обогащения топлива в твэлах для достижения необходимого уровня энерговыделения при мощности реактора 5 МВт.

На рисунках 5.11 и 5.12 приведены распределения мощности участков опытного и подогревающего 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.

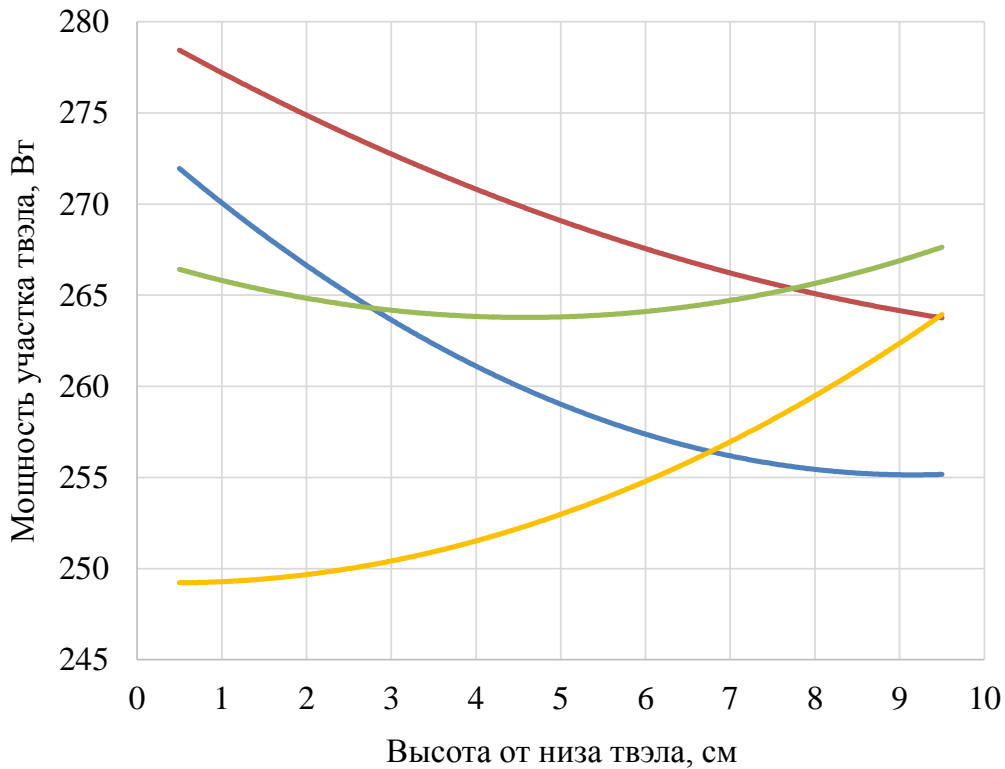


Рисунок 5.11 – Распределение мощности по высоте для различных времен облучения опытного твэла при мощности реактора 5 МВт,
 где: — 0 суток, — 1,5 суток, — 26 суток, — 56 суток

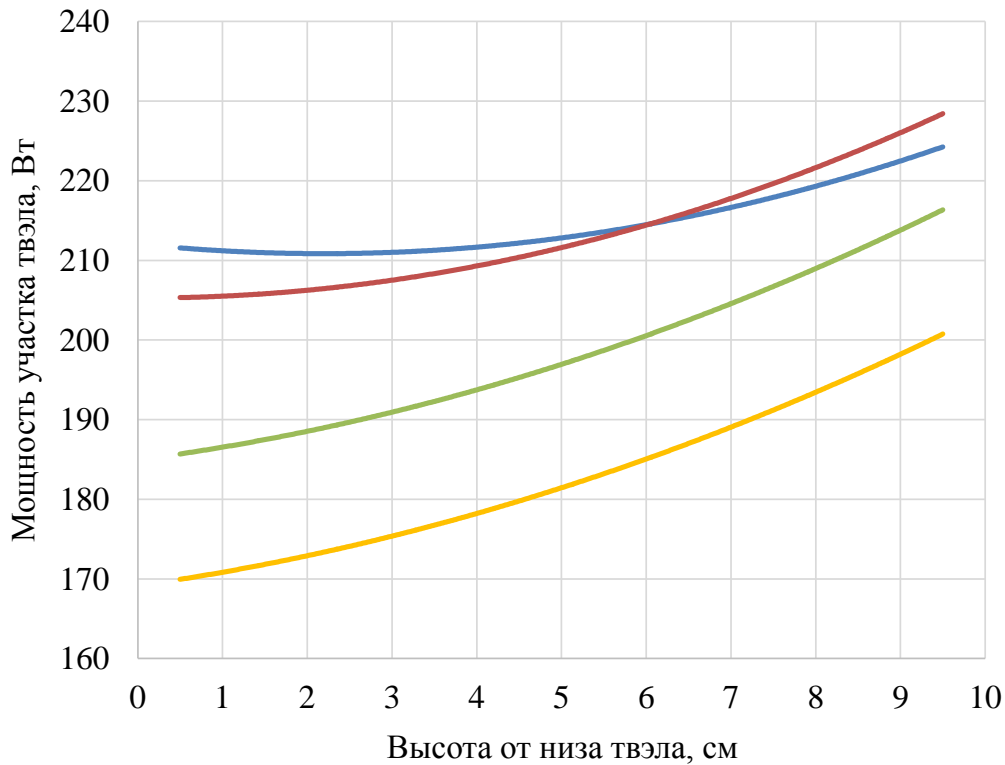


Рисунок 5.12 – Распределение мощности по высоте для различных времён облучения подогревающего твэла при мощности реактора 5 МВт, где: — 0 суток, — 1,5 суток, — 26 суток, — 56 суток

График изменения средней по высоте линейной тепловой нагрузки опытного и подогревающего твэлов за все время облучения приведён на Рисунке 5.13.

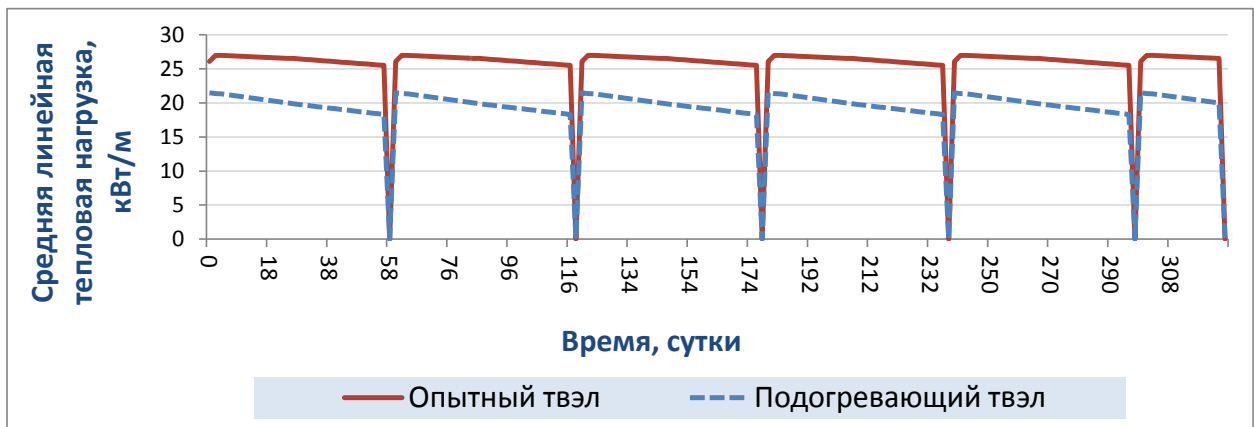


Рисунок 5.13 - Изменение средней по высоте линейной тепловой нагрузки опытного и подогревающего твэлов

Рассмотренные выше данные использовались в качестве исходных для моделирования в программе SOTAR поведения опытного и подогревающего твэлов при их облучении в АУ-СКД в реакторе ИР-8. Исходные данные загружались в Excel-файле.

Рассчитанная глубина выгорания топлива составила для опытного твэла ~ 27 МВт сут/кг, для подогревающего ~ 20 МВт сут/кг.

Полученные результаты расчётов в SOTAR опытного и подогревающего твэлов приведены на Рисунках 5.14 – 5.17.

На Рисунках 5.14 – 5.15 приведены полученные с использованием программы SOTAR графики изменения центральной температуры и температуры поверхности топлива от времени. Из графиков видно, что полученные значения являются приемлемыми. Центральная температура, как и температура поверхности топлива, в опытном твэле выше, чем в подогревающем. При циклическом снижении мощности реактора температура топлива твэлов также сильно уменьшается. Увеличение температуры топлива твэлов в начале облучения, которое более подробно показано на Рисунке 5.14 (б), может быть объяснено влиянием доуплотнения диоксида урана (которое существенно на данном этапе) и, как следствие, увеличением зазора между топливом и оболочкой [115]. 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 твэла при его более длительном облучении (~ 250–300 суток) объясняется, в частности, более значимым влиянием на это ухудшения проводимости зазора между топливом и оболочкой.

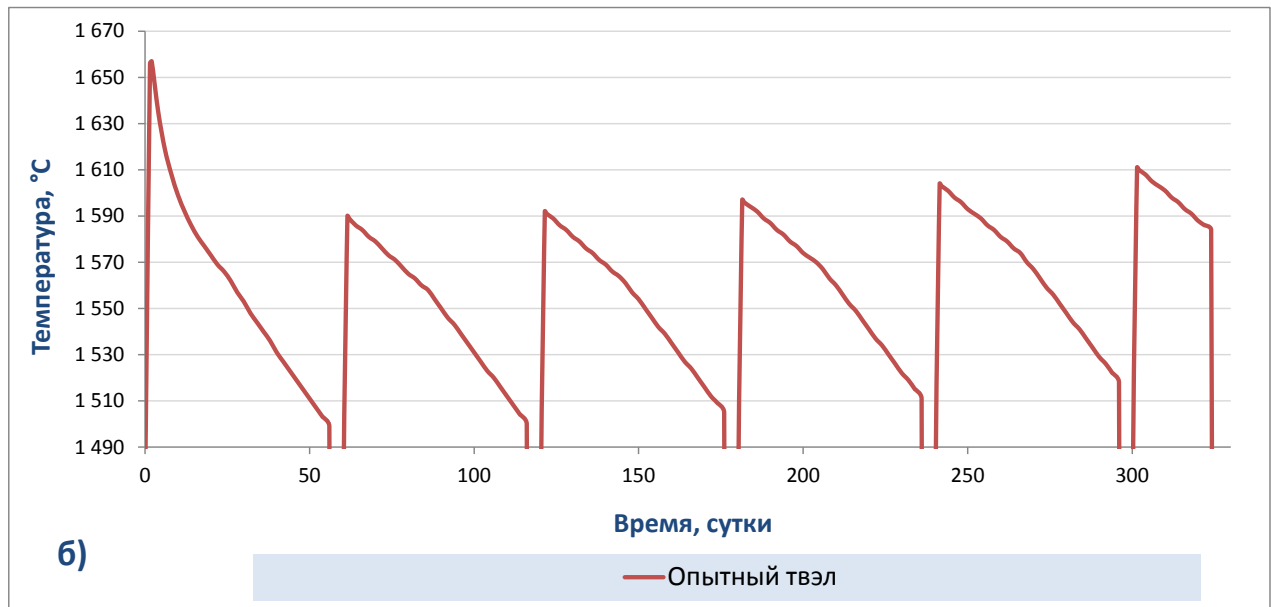
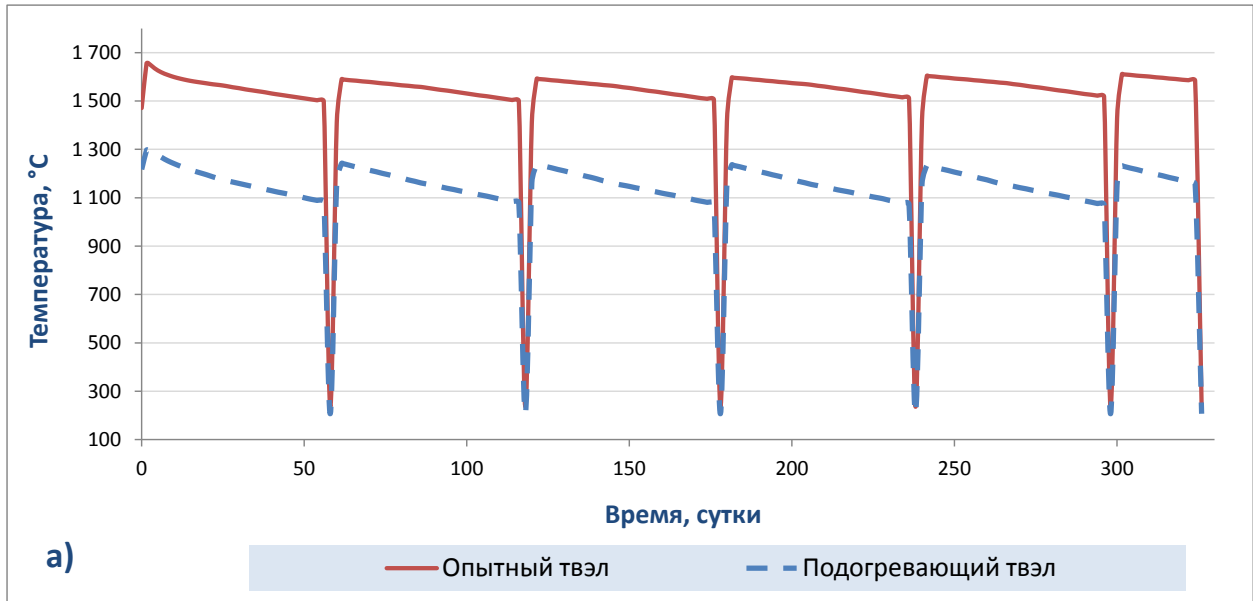


Рисунок 5.14 – Изменение центральной температуры топлива опытного и подогревающего ТВЭЛ (осевое положение, соответствующее средней плоскости топливного столба):

а) сравнение температуры опытного и подогревающего ТВЭЛ,

б) температура опытного ТВЭЛ более подробно

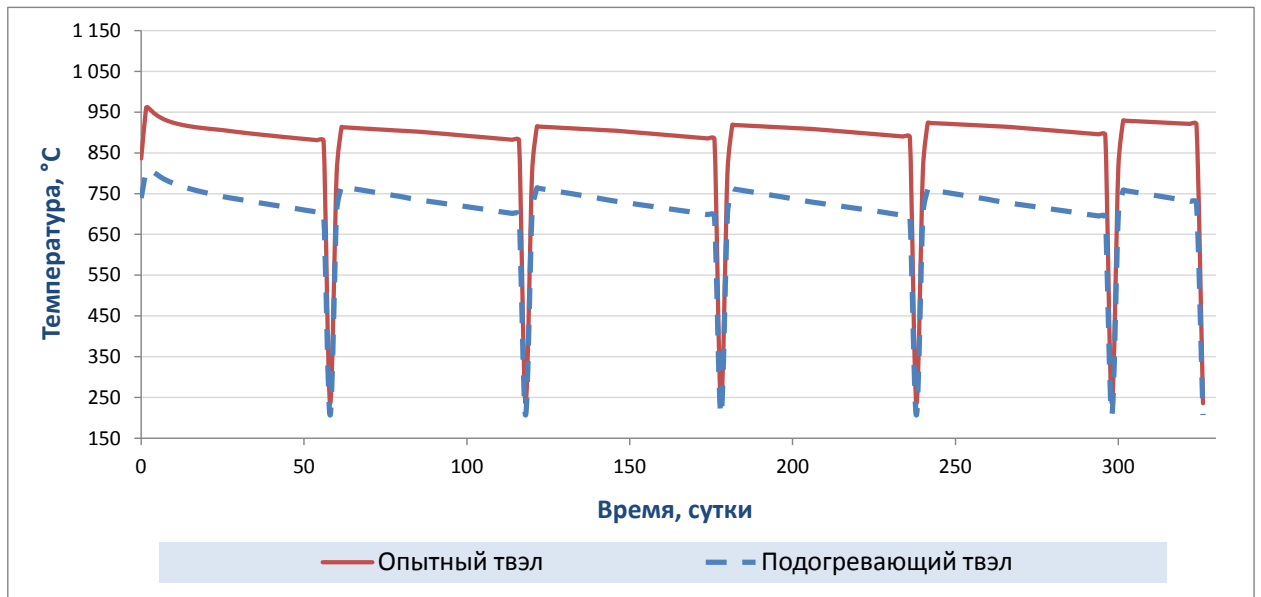


Рисунок 5.15 – Изменение температуры поверхности топлива опытного и подогревающего ТВЭЛ (осевое положение, соответствующее средней плоскости ТВЭЛ)

На Рисунке 5.16 приведён полученный с использованием программы SOTAR график изменения внутреннего давления в ТВЭлах от времени облучения. График иллюстрирует тенденцию увеличения внутреннего давления в ТВЭлах (с его периодическим уменьшением, которое соответствует снижению мощности реактора). В подогревающем ТВЭле давление увеличивается незначительно. Видно, что величина и скорость роста давления в опытном ТВЭле больше, чем в подогревающем. При одинаковом значении стартового давления под оболочкой, объема пленума и радиуса центрального отверстия различия в графиках на Рисунке 5.16 можно объяснить большей мощностью и соответственно большей температурой топлива опытного ТВЭЛ. Исследования зависимости внутреннего давления в ТВЭле от его мощности и других факторов описана, в частности, в работе [26].

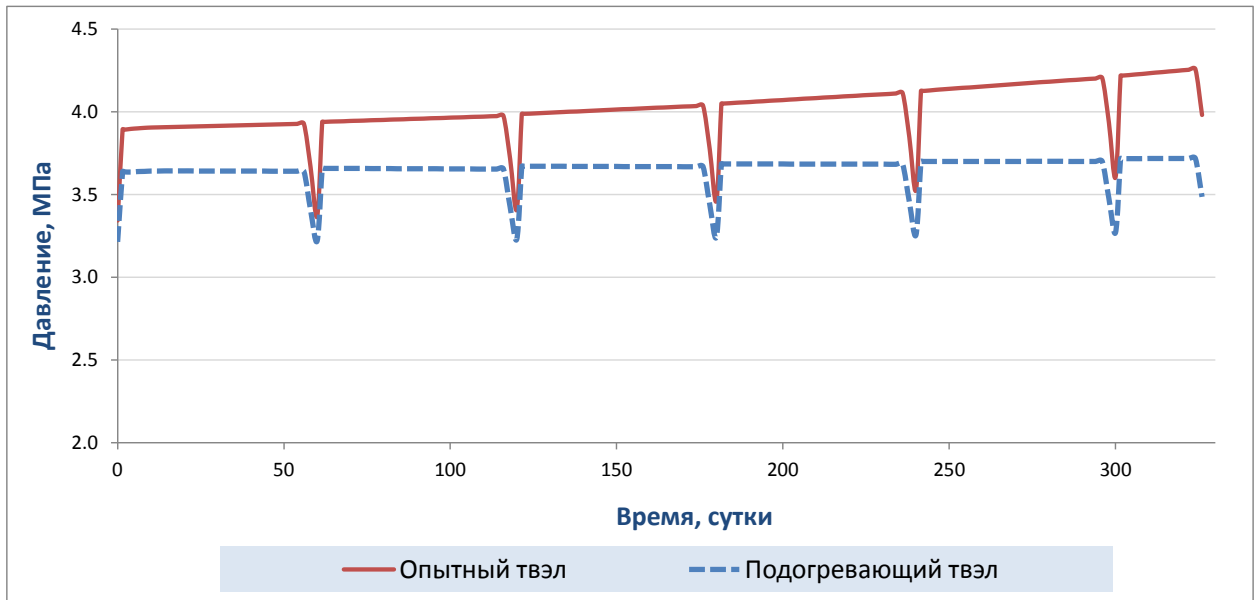


Рисунок 5.16 – Изменение внутреннего давления в опытном и подогревающем ТВЭлах

Динамика температуры внешней поверхности оболочки опытного и подогревающего ТВЭлов показана на Рисунке 5.17.

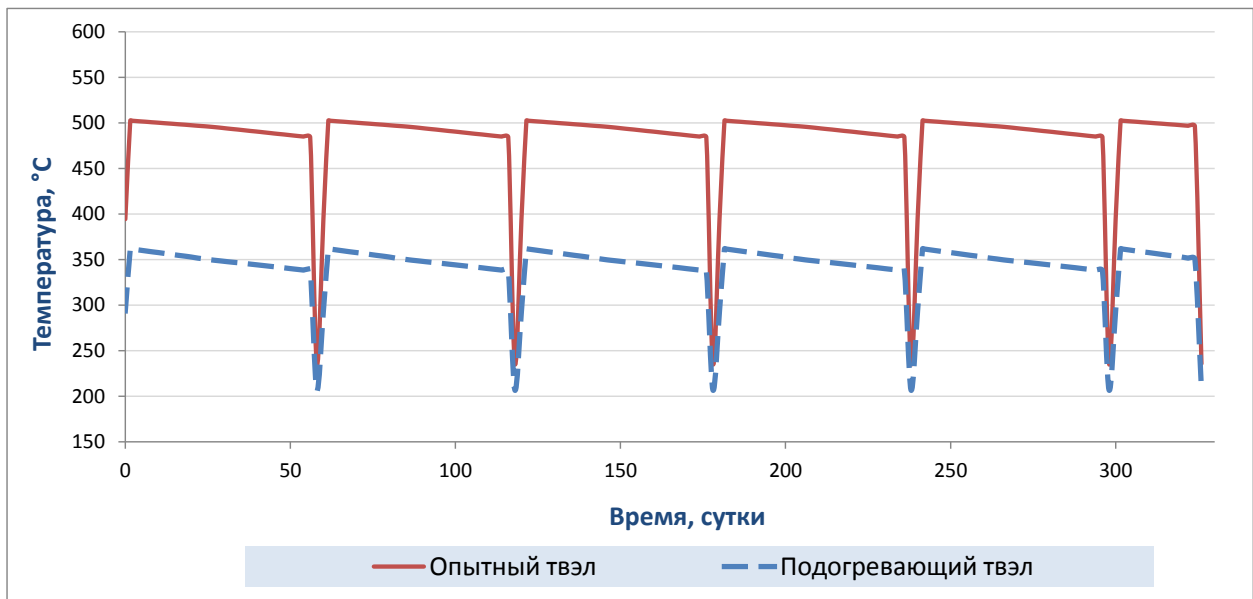


Рисунок 5.17 – Изменение температуры внешней поверхности оболочки опытного и подогревающего ТВЭла (осевое положение, соответствующее средней плоскости ТВЭла)

Данные, представленные на Рисунке 5.17, 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. Максимальный перепад температуры внешней поверхности оболочки по высоте опытного ТВЭла составляет в данном случае ~ 100 °C. Такие средние

температуры соответствуют условиям эксплуатации твэлов проектируемых реакторов ВВЭР-СКД.

Примеры распределения параметров опытного и подогревающего твэлов по высоте для конкретного расчетного шага представлен в Таблицах 5.4 и 5.5.

Таблица 5.4 - Распределения параметров опытного твэла по высоте для 7 расчетного шага (10 сутки)

Расстояние от низа твэла, см	Линейная нагрузка, Вт/см	Центральная температура, °С	Температура поверхности топлива, °С	Температура внутренней поверхности оболочки, °С	Температура внешней поверхности оболочки, °С	Величина радиальн. зазора, мкм
1	274	1581	896	510	466	102
2	272	1583	902	518	474	103
3	271	1587	909	526	483	104
4	269	1593	916	534	491	105
5	268	1599	924	543	500	106
6	267	1607	932	552	509	107
7	266	1615	940	561	519	108
8	266	1625	949	570	528	108
9	265	1636	958	579	538	109
10	265	1648	968	589	548	110

Таблица 5.5 - Распределения параметров подогревающего твэла по высоте для 7 расчетного шага (10 сутки)

Расстояние от низа твэла, см	Линейная нагрузка, Вт/см	Центральная температура, °С	Температура поверхности топлива, °С	Температура внутренней поверхности оболочки, °С	Температура внешней поверхности оболочки, °С	Величина радиальн. зазора, мкм
1	199	1165	730	412	320	106
2	200	1182	740	421	328	106
3	201	1198	750	430	337	107
4	203	1219	762	441	347	107
5	205	1241	775	452	358	108
6	208	1267	789	464	369	108
7	211	1296	805	477	381	109
8	215	1328	822	491	394	109
9	220	1362	839	505	407	109
10	224	1648	968	589	548	110

Таким образом, отработан способ проведения расчётов процессов в ТВЭлах при их испытаниях в АУ-СКД на реакторе ИР-8 с использованием программы SOTAR.

5.3. Способ оценки влияния инструментации ТВЭлов на распределение температур в оболочке и топливе испытываемого ТВЭла

Как уже отмечалось, при выборе параметров инструментированного ТВЭла возможно изменение его конструкции (например, изменение диаметра топливного сердечника, утолщение оболочки, изменение внешнего диаметра ТВЭла, заделка термопар на оболочке и другое). В таком случае необходимо проведение оценок динамики процессов в ТВЭле под облучением. Одним из важнейших оцениваемых параметров является распределение температуры в ТВЭле. Алгоритм проведения с использованием написанной MathCad-программы предварительных оценок распределения температуры в инструментированном ТВЭле рассмотрен далее.

Использовалась модель, в которой область ТВЭла разбивалась последовательно на несколько слоев по радиусу (r_i). В данном случае, в качестве одного из допущений принималось, что передача тепла происходит только в радиальном направлении. Для последовательной цепи составлялась система уравнений, содержащих неизвестные температуры. Определялись температуры на границе каждого слоя, после строилось распределение температуры внутри каждого слоя. Расчет проводился для заданного значения q_L . [101] Принципиальная схема радиального распределения температуры в стержневом ТВЭле приведена на Рисунке 5.18 [14].

При проведении расчетов использовались следующие зависимости коэффициентов теплопроводности λ (Вт/(м·°С)) от температуры t (°С).

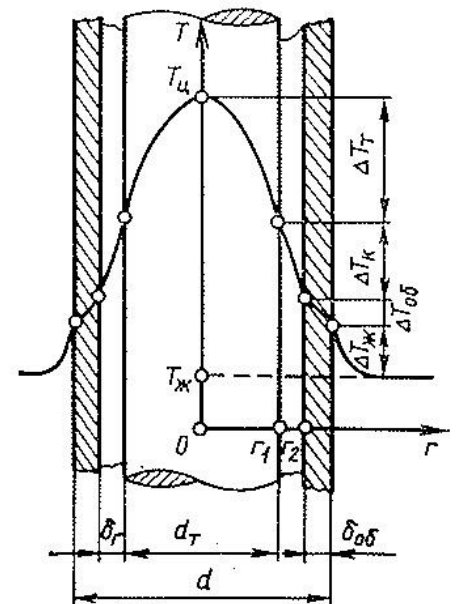


Рисунок 5.18. Схема радиального распределения температуры в стержневом ТВЭле

Для диоксида урана:

$$\lambda_{UO_2}(t) = 8.706 + (-9.11 * 10^{-3}) * t + 3.992 * 10^{-6} * t^2 + (-5.004 * 10^{-10}) * t^3 \quad (5.2)$$

Для гелия:

$$\lambda_{He}(t) = 0.146 + 3.339 * 10^{-4} * t + (-4.219 * 10^{-8}) * t^2 \quad (5.3)$$

Формула зависимости от температуры для коэффициента теплопроводности стали ЧС-68 была построена по табличным данным [114]:

$$\lambda_{Оболочка}(t) = 14.955 + 0.011 * t \quad (5.4)$$

Для оценки влияния заделки термопар (типа ХА) на теплопроводность оболочки твэла было консервативно принято, что заделанные термопары образуют «единый слой». В качестве значения коэффициента теплопроводности этого слоя было взято значение $\lambda = 17.6$ Вт / (м·°С). Зависимость λ от температуры в данном случае не учитывалось. Также не учитывалось влияние припоя.

Перед проведением расчетов распределения температур в инструментированном подогревающим твэле, который предполагается облучать в АУ-СКД, предложенная MathCad-программа была отработана при расчете параметров твэлов с различными исходными характеристиками. Результаты расчётов, сделанные в MathCad, сравнивались с аналогичными оценками, проводившимися в программном комплексе ANSYS. Сопоставление полученных результатов показывает их хорошее согласование.

В качестве исходных данных для расчета в MathCad-программе использовались, в частности, параметры твэла, приведенные в Таблице 5.3, и данные, полученные при расчетах в SOTAR для не инструментированных твэлов (Таблица 5.5). Были взяты параметры твэла, полученные в SOTAR на 7 расчетном шаге (10 суток облучения), когда величина зазора между топливом и оболочкой превышает исходную вследствие преобладающего влияния доуплотнения топлива на ранних этапах облучения.

На внешней поверхности оболочки твэла было задано граничное условие первого рода – температура поверхности составляет 358 °С. Энерговыведение задаётся в топливе (без учётов внутренних источников тепла в оболочке за счет поглощения гамма-излучения), исходя из линейной плотности теплового потока $q_L = 205$ Вт/см.

Были рассмотрены различные варианты качества заделки термопары в оболочку твэла. Результаты расчетов распределения температур в радиальном сечении

(центральное подоложение по высоте) для инструментированного термопарами подогревающего твэла представлены на Рисунке 5.19.

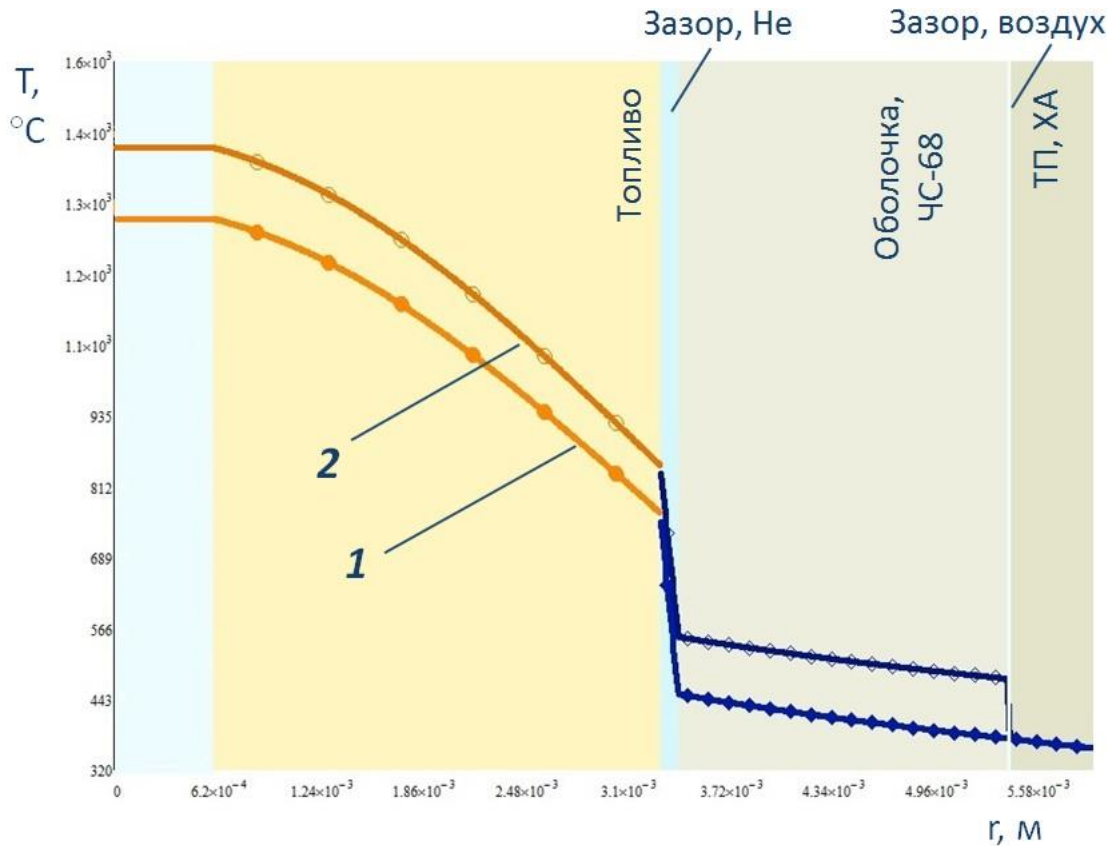


Рисунок 5.19. Расчет в MathCad радиального распределения температур для инструментированного подогревающего твэла, где 1) случай хорошей заделки ТП; 2) случай заделки термопары, когда между ТП и оболочкой имеется зазор, заполненный воздухом

Из Рисунка 5.19 видно, что в случае хорошей заделки (1) (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 выше. При этом, для обоих вариантов полученные температуры топлива являются приемлемыми.

Выполненные расчёты носят оценочный характер и проводились с рядом допущений. В частности, учитывалась передача тепла только в радиальном направлении, не учитывалось энерговыделение в оболочке за счёт поглощения гамма-излучения. Также необходимо отметить, что при полноценном анализе необходимо комплексно принимать во внимание динамику всех процессов в твэле, происходящих под влиянием облучения при его эксплуатации. Учитывая предположение, что зазор

между топливом и оболочкой будет уменьшаться в процессе облучения, то проведенные при наибольшей величине зазора в начальный период испытаний оценки максимальной температуры топлива можно считать консервативными. Такие оценки могут использоваться на начальных этапах проектирования при принципиальном выборе способа инструментации исследуемых твэлов.

Заключение по разделу 5

С использованием программы SOTAR был отработан способ моделирования процессов внутри опытных твэлов инновационных ВВЭР при их облучении в ампульном устройстве в реакторе ИР-8. Показана важность проведения при планировании ампульных реакторных испытаний оценок внутритвэльных процессов, а также их взаимосвязь с другими необходимыми в данном случае расчетными обоснованиями (в частности, с нейтронно-физическими, теплогидравлическими и прочностными расчетами).

Приведены результаты моделирования с использованием программы SOTAR процессов в опытном толерантном твэле с оболочкой из FeCrAl и сердечником из диоксида урана, а также в опытных твэлах для разрабатываемого реактора ВВЭР-СКД при их облучении в реакторе ИР-8. Полученные расчетные оценки центральной температуры топлива являются приемлемыми (не превышают температуру плавления). Температуры поверхности оболочек опытных твэлов толерантного типа соответствуют условиям испытаний при параметрах эксплуатации твэлов реакторов типа ВВЭР. Средние значения температуры поверхности оболочек твэлов в АУ-СКД являются приемлемыми для их эксплуатации при параметрах разрабатываемого реактора ВВЭР-СКД.

Работы по дальнейшему развитию программы SOTAR планируется продолжать. Естественно предположить, что полученные на текущем этапе результаты могут быть в дальнейшем уточнены при усовершенствовании программы. В числе направлений дальнейшего развития SOTAR рассматриваются возможности по верификации программы для проведения расчётов при более высоких выгораниях топлива, уточнение влияния теплоносителя на охлаждение твэла, а также реализация возможности

проведения расчётов для других кандидатных материалов оболочек твэлов перспективных ЯЭУ.

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. Таким образом, 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 внутриапульной 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 реактора ВВЭР-СКД и опытных твэлов толерантного типа в контролируемых и регулируемых условиях.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЗ – активная зона

АУ – ампульное устройство

АУ-СКД - ампульное устройство для испытаний образцов в среде СКД-теплоносителя

АЭС – атомная электростанция

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор

ВВЭР-СКД – реактор с водяным теплоносителем сверхкритических параметров

ВХР – водно-химический режим

ВЭК - вертикальный экспериментальный канал

ГПД – газообразные продукты деления

ГЭК - горизонтальный экспериментальный канал

ИР – исследовательский реактор

КМ – конструкционные материалы

МАГАТЭ - Международное агентство по атомной энергии

ОТ – опытный твэл

ПИД-регулятор - пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор

РБМК - реактор большой мощности канальный

СКД – сверхкритическое давление

СУЗ – система управления и защиты

ТВС – тепловыделяющая сборка

ТП – термопара

ТЭП – термоэлектрический преобразователь

ХА – хромель-алюмель

ЭУ – экспериментальное устройство

ЯЭУ – ядерная энергетическая установка

ATF – accident tolerant fuel

PWR - pressurized water reactor

Список использованной литературы

1. Ю.М. Семченков. Научное руководство в развитии легководного направления атомной энергетики по проектам ВВЭР // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2023. – Вып. 1. – С. 9—23.
2. Асмолов В.Г. Перспективы развития технологии ВВЭР, Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики // VI Международная научно-техническая конференция: сб. докл. конф. (Москва, 14–17 ноября 2023 г.). – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2023. – 307 с.
3. Гончаров В.В. Исследовательские реакторы. – М.: Советская атомная наука и техника, 1967, С. 44-78.
4. Самсонов Б.В., Цыканов В.А. Реакторные методы материаловедения. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 248 с.
5. Исследовательские ядерные установки России [под ред. Н.В. Архангельского, И.Т. Третьякова, В.Н. Федупина]. М.: ОАО «НИКИЭТ», 2012. – 328 с.
6. Гончаров В.В. Исследовательские реакторы: Создание и развитие. – М.: Наука, 1986. – 38 с.
7. Ковальчук М.В., Ильгисонис В.И., Штромбах Я.И., Курский А.С., Андреев Д.В. Развитие реакторной экспериментальной базы НИЦ “Курчатовский институт”: от пуска Ф-1 до 60-летия реактора ИР-8 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2017. – Вып. 3. – С. 4–16.
8. Яковлев В. В. Испытания ядерного топлива и конструкционных материалов в реакторах РФТ, МР и ИР-8 // История науки и техники. – 2013. – № 8. – С. 28-37.
9. Бать Г.А., Коченов А.С., Кабанов Л.П. Исследовательские ядерные реакторы: Учебное пособие для вузов. – М., Атомиздат, 1972.
10. Цыканов В. А., Самсонов Б. В., Тимченко Р. А., Шулимов В. Н., Лобанов Г.П. Ампульные устройства для облучения материалов в высокопоточном реакторе СМ-2 // Атомная энергия. – 1970. –Т.29. – Вып.3 – С.169-174.
11. Атомная наука и техника СССР [под ред. А.М. Петросьянца]. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 312 с.; ил.
12. Самойлов А.Г., Волков В.С., Солонин М.И. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 400 с.

13. Набойченко К.В. Техника реакторного эксперимента: Учебное пособие. – Ч. 1. – М.: МИФИ, 2008. – 88 с.

14. Кокорев Л.С., Харитонов В.В. Теплогидравлические расчеты и оптимизация ядерных энергетических установок : учеб. пособие для вузов [под ред. В.И. Субботина]. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.

15. Ма Б.М., Материалы ядерных энергетических установок: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 408 с.; ил.

16. 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.

17. А.В. Алексеев, О.И. Дреганов, Н.А. Иванов, И.В. Киселёва, М.А. Мокеичев, Т.В. Базова. Расчёт параметров испытаний твэлов в канале реактора МИР при сверхкритическом давлении воды, Сб. трудов АО ГНЦ НИИАР. – 2022. – Вып. 3. – С. 38–45.

18. Яковлев В.В., Ерак Д.Ю., Гончаров Л.А., Киселев Алексей С., Кругликов А.Е., Михин О.В., Насонов В.А., Песня Ю.Е., Седов А.А., Хмызов Н.В., Чабак А.Ф., Яшин А.Ф. Техника и методика исследований в реакторе ИР-8 опытных твэлов с разными топливными композициями // Вопросы атомной науки и техники. – 2017. – №3. – С. 49-57.

19. 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.

20. Куканов В. Ю., Седов А. А., Поляков П. С. Разработка методов проведения ампульных экспериментов для обоснования ампульного облучения опытных твэлов реактора ВВЭР-СКД в исследовательских реакторах // XI Всероссийская молодёжная конференция: сб. тезисов докл. (Дмитровград, 2023). – Дмитровград, 2023. – С. 5-6.

21. Алексеев Н.И., Гомин Е.А., Марин С.В., Насонов В.А., Шкаровский Д.А., Юдкевич М.С. Программа MCU-PTR для прецизионных расчётов исследовательских

реакторов бассейнового и бакового типов // Атомная энергия. – 2010. – Т. 109. – Вып. 3. – С. 123–129.

22. П. В. Алексеев, А. С. Киселев, А. С. Киселев и др. Термомеханические расчеты элементов оборудования и элементов активных зон реакторных установок с использованием кодов UZOR-1.0 и МАВР-5 // Безопасность, эффективность, ресурс : сб. тезисов докладов 13-й Международной научно-практической конференции по атомной энергетике (Севастополь, 03–06 октября 2017 г.) – Севастополь, 2017. – С. 100-101.

23. Yakovlev V., Strijov P., Murashov V. et.al. Qualification and Interpretation of MR Test Reactor Irradiation Data on VVER-440 Type Fuel Rods for Fuel Thermal Model Validation. IAEA-TC-659/1.4, 1987. – P. 50-56.

24. Волков Б.Ю., Рязанцев Е.П., Яковлев В.В. и др. Исследование поведения топлива ВВЭР и PWR, облученного в реакторе HBWR (Халден, Норвегия) // Атомная энергия. – 2011. – Т. 111 – № 6. – С. 342-347.

25. Волков Б. Ю. Изменение характеристик топлива ВВЭР и PWR при совместных испытаниях в реакторе HBWR : Автореф. дис. канд. техн. наук. – Москва, 2012. – 131 с.

26. Волков Б.Ю., Яковлев В.В., Рязанцев Е.П., Калыгин В.В., Бурукин А.В., Иванов А.В., Пименов Ю.В. Особенности внутриреакторного поведения диоксида уранового топлива ВВЭР и PWR с таблетками разной формы // Атомная энергия. – 2013. – Т. 114, № 3. – С. 139-144.

27. Westinghouse выведет из эксплуатации два норвежских исследовательских реактора в Халдене и Кьеллере, [Электронный ресурс: <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/07/19/126545>] Дата обращения (19.03.24)

28. Кокорев Л.С., Мурашов В.Н., Яковлев В.В. Исследование теплового состояния ТВЭЛов типа ВВЭР-1000, ИАЭ-3341/3. Москва, 1980.

29. Андросов А.В., Выбыванец В.И., Колесников Е.Г., Сериков В.С., Солнцева Е.С., Степанчиков П.А., Русских И.М., Селезнев Е.Н. Экспериментальное устройство для реакторных испытаний элементов конструкции высокотемпературных ТВЭЛ // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2015. – С. 85–92.

30. Новиков В.В., Кузнецов В.И., Салатов А.В. Современные подходы к проектированию ТВЭЛов ВВЭР // Атомная энергия. – 2015. – Т. 119, № 5. – С. 269-274.

31. Van U.P., Hales J., Li W., Rossiter G., Williamson R. A review of fuel performance modelling // *Journal of Nuclear Materials*. – Vol. 516. – 2019. – P. 373–412.

32. 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.

33. Молотова И.А., Забиров А.Р., Ягов В.В., Яшников Д.А., Шевченко С.А. Вопросы расчетно-экспериментальных теплофизических исследований применительно к толерантному топливу для АЭС с водо-водяными реакторами // *Ядерная и радиационная безопасность*. – 2022. – № 4 (106). – С. 29–40.

34. Рязанцев Е.П., Насонов В.А., Егоренков П.М., Яковлев В.В., Яшин А.Ф., Кузнецов И.А., Рожнов В.Н. Экспериментальные возможности и перспективы использования реактора ИР-8 РНЦ «КИ» для фундаментальных и прикладных исследований, ИАЭ-6411/4, Москва, 2006.

35. Рязанцев Е.П. К 50-летию ИРТ (История создания и развития) // *Атомная энергия*. 2008. – Т. 104. – Вып. 6. – С. 359–367.

36. Насонов В.А., Песня Ю.Е. Спектры нейтронов в экспериментальных каналах реактора ИР-8. // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов*. – 2017. – Вып.3. – С.65–70.

37. Erak 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. *Proceedings of the 13th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. (Nessebar, Bulgaria, 15–21 September 2019). Nessebar, 2019. – P. 332– 335.

38. Практические основы разработки и обоснования технических характеристик и безопасности эксплуатации реакторных установок типа ВВЭР. – М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2015. – 480 с.: 115 илл.

39. Лиханский В.В., Сорокин А.А., Зборовский В.Г., Улыбышев К.Е., Строжук А.В. Моделирование термомеханического поведения твэлов с выгорающим поглотителем на основе оксида гадолиния в коде РТОП-СА // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. – 2021. – Вып. 4. – С. 35 – 46.

40. Демьянов П.Г. Радиационно-термическое уплотнение, релокация и распухание топлива (Обзор) // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2023. – Вып. 3. – №119. – С.160 – 179.

41. Угрюмов А.В. Оптимизация структуры уран-гадолиниевых таблеток в обеспечение перспективных требований новых проектов топлива ВВЭР, Автореф. дис. канд. техн. наук. – Москва. 2021. 135 с.

42. Шишкин А.А., Косоуров Е.К., Кузин В.Е. Топливный цикл реактора PWR: повышенное обогащение, комбинирование $ER2O3$ и $GD2O3$ в качестве выгорающих поглотителей // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2023. – Вып. 5. – №121. – С. 131–140.

43. 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 // 21-ая Международная конференция молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам: сб. докл. – Подольск: ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2019, С. 410.

44. Zinkle S.J., Terrani K.A., Gehin J.C., Ott L.J., Snead L.L. Accident tolerant fuels for LWRs: A perspective // Journal of Nuclear Materials. – 2014. – V.448. – P. 374-379.

45. Семенов Е.В., Харитонов В.В. Влияние устойчивого к авариям ядерного топлива на экономические параметры АЭС // Атомная энергия. – 2022. – Т. 133. – Вып. 5-6. – С. 309-316.

46. Карпюк Л.А., Кузнецов В.И., Маслов А.А., Новиков В.В., Орлов В.К. Топливо с хромовым покрытием оболочки твэла, устойчивое к аварии // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130, Вып. 3. – С. 142-148.

47. Карпюк Л.А., Новиков В.В., Кулаков Г.В., Коновалов Ю.В., Леонтьева-Смирнова М.В., Голубничий А.А., Иванов С.И., Макаров Ф.В., Глебов А.В. Сплав 42ХНМ и карбид кремния как материал оболочек твэлов, устойчивых к авариям // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130, Вып. 4. – С. 211-215.

48. Гурович Б.А., Фролов А.С., Кулешова Е.А., Федотов И.В. Влияние длительных высокотемпературных выдержек на механические свойства и структуру сплава 42ХНМ после нейтронного облучения в составе ВВЭР -1000. Часть 1. Механические испытания // Вопросы материаловедения. – 2023. – № 1 (113), С. 134-149.

49. Круглов А.Б., Савельев М.Д., Тарасов Б.А. Зависимость теплофизических свойств сплавов системы Fe-Cr-Al-Si от состава и температуры // Черные металлы. – 2022. – № 12. – С. 72-75.

50. Якушкин А.А. О проблемах создания оболочек ТВЭЛов для толерантного топлива из циркониевых сплавов // Физика и химия обработки материалов. – 2021. – № 3. – С. 69–78.

51. Карпюк Л.А., Новиков В.В., Гозман М.И., Хомяков О.В., Новое топливо тепловых реакторов в условиях аварии с потерей теплоносителя // Атомная энергия. – 2023. – Т. 134. – Вып. 1-2. – С. 40-48.

52. Долгов А.И., Дреганов О.И., Маркелов А.Н., Мокеичев М.А., Сычугов М.С. Реакторные испытания экспериментальных твэлов толерантного типа в петлевых каналах реактора МИР. Научные исследования и технологические разработки для обеспечения развития ядерных технологий нового поколения // XI Всероссийская молодёжная конференция : сб. тезисов докл. – Дмитровград, 2023. – С. 103 - 105.

53. Ижутов А.Л., Дреганов О.И., Алексеев А.В., Ещеркин А.Г., Иванов Н.А., Киселёва И.В., Маркелов А.Н., Овчинников В.А., Сычугов М.С., Яшин Р.А., Новиков В.В., Кузнецов В.И., Федотов П.В., Нечаева О.А. Испытания ATF-твэлов в условиях импульсной аварии в реакторе МИР. Научные исследования и технологические разработки для обеспечения развития ядерных технологий нового поколения // XI Всероссийская молодёжная конференция : сб. тезисов докл. – Дмитровград, 2023. – С. 8.

54. Деев В.И., Круглов А.Б., Маслов Ю.А., Махин В.М., Харитонов В.С., Чуркин А.Н. Ядерные реакторы с водой сверхкритического давления (основы теплового расчета) : Учебное пособие [ред. В.И. Деев]. – М.: НИЯУ МИФИ, 2015. – 156 с.

55. Кириллов П.Л. Теплообмен и верификация кодов реакторов, охлаждаемых водой сверхкритического давления // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130. – Вып. 4. –С. 198-203.

56. Pan Wu, Yanhao Ren, Min Feng, Jianqiang Shan, Yanping Huang, Wen Yang. A review of existing SuperCritical Water reactor concepts, safety analysis codes and safety characteristics // Progress in Nuclear Energy. – 2022. – No.153. – P.1-15.

57. Сахипгареев А.Р., Шлепкин А.С., Морозов А.В. Обзор современных концепт-проектов энергетических реакторов с водяным теплоносителем сверхкритических

параметров // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2022. – Вып. 1. – С. 52 - 66.

58. Махин В. М., Чуркин А. Н., Концептуальные предложения по водоохлаждаемому реактору со сверхкритическими параметрами (обзор зарубежных и российских разработок SCWR), Сб. докл. научно-технической конференции «Теплофизика реакторов нового поколения». (Обнинск, 16–18 мая 2018 г.), Обнинск, ГНЦ РФ – ФЭИ, 2018, 424 с.

59. Седов А.А., Бландинский В.Ю., Котов Я.А., Д. С. Кузенкова, А. С. Лапин, В. А. Невиница, С. Б. Пустовалов, А. С. Степанов, С. А. Субботин, П. А. Фомиченко, Б. И. Фонарев, А. А. Фролов. Концепция ядерной энергетической установки на базе многоцелевого тестового исследовательского реактора малой мощности с легководным теплоносителем сверхкритических параметров // Теплоэнергетика. – 2023. – № 5. – С.5-22.

60. Седов А.А., Поляков П.С., Пустовалов С.Б., Паршин В.В., Симонов С.С. Основные результаты тестовых испытаний замкнутого контура с естественной циркуляцией легководного теплоносителя при сверхкритическом давлении // Теплоэнергетика. – 2023. – Вып. 3. – С.73–86.

61. Марголин Б.З., Пирогова Н.Е., Сорокин А.А., Кохонов В.И., Дуб А.В., Сафонов И.А. Исследование сопротивления коррозионному растрескиванию под напряжением облученной ферритно-мартенситной нержавеющей стали 07X12НМФБ в сверхкритической водной среде. Часть 1. Проведение автоклавных испытаний // Вопросы материаловедения. – 2023. – № 3(115). – С.202–216.

62. Симонов С.С., Баланин А.Л. Планирование дореакторных, реакторных и послереакторных исследований конструкционных материалов и опытных твэлов реактора ВВЭР-СКД с быстрым спектром нейтронов. Научные исследования и технологические разработки для обеспечения развития ядерных технологий нового поколения // XI Всероссийская молодёжная конференция : сб. тезисов докл. – Димитровград, 2023. – С. 19.

63. Зборовский В.Г., Хоружий О.В., Лиханский В.В., Елкин Н.Н., Чернецкий М.Г., Аверченко П.А., Грачев Д.С., Хорохорин М.В., Белоусов В.И., Давиденко В.Д., Дьячков И.И., Иоаннисиан М.В., Малков М.Р. Согласованное моделирование тепловых и нейтронно-физических параметров в активной зоне реактора с водяным теплоносителем

сверхкритического давления // Вопросы атомной науки и техники, Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2023. – Вып. 3. – С.100-114.

64. Мосин А.М., Евсеев М.В., Портных И.А., Щербаков Е.Н., Шихалев В.С., Митрофанова Н.М., Козлов А.В. Изменение физико-механических свойств оболочек твэлов из сталей ЭК164 и ЧС68 после эксплуатации в реакторе БН-600 в течение четырех микрокомпаний // Известия вузов. – 2011. – № 1. – 224-230.

65. Пышин И.В., Белов И.А., Седов А.А., Теплов П.С., Шимкевич А.Л. Проблемы коррозии и массопереноса в реакторном контуре двухконтурного энергетического корпусного реактора с закритическими параметрами воды. Материалы Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, Россия, 2011.

66. Юрчевский Е.Б., Чуркин А.Н., Семишкин В.П., Чусов И.А., Шарый Н.В., Кавун О.Ю. Водно-химический режим ВВЭР-СКД и основные системы его обеспечения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2023. – Вып. 3. – С.64–75.

67. Кириллов П.Л., Богословская Г.П. Водоохлаждаемые АЭС четвертого поколения ВВЭР-СКД. Реальные перспективы и программа исследований // Известия вузов. – 2018. – № 4. С. 5-14.

68. Кабакчи С.А., Архипов О.П., Множественность радиационно-химических стационарных состояний при радиоллизе водного теплоносителя в ядерном реакторе // Химия высоких энергий. – 2016. – Т.50. – № 2. – С.121–126.

69. Алиев Т.Н., Евдокимов И.А., Лиханский В.В., Махин В.М. Оценки влияния радиолиза на коррозионную стойкость оболочек твэлов ВВЭР в условиях поверхностного кипения теплоносителя // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. – 2009. – Вып. 25. – С. 96.

70. Махин В.М., Пиминов В.А., Семишкин В.П., Чуркин А.Н., Чусов И.А., Лапин А.В. Использование опыта создания и эксплуатации одноконтурных реакторов с кипением и ядерным перегревом теплоносителя для проектирования реакторов со сверхкритическими параметрами теплоносителя // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2021. – Вып. 2. – С.4-17.

71. Мохов В.А., Васильченко И.Н., Никитенко М.П., Махин В.М., Лапин А.В., Четвериков А.Е., Чуркин А.Н., Аникеев Ю.А., Шмелев С.В. Проблемные вопросы по

активной зоне корпусного реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя (ВВЭР-СКД) // Тяжелое машиностроение. – 2014. – № 9. – С.2-13.

72. Махин В.М., Васильченко И.Н., Вьялицын В.В., Кушманов С.А., Куракин К.Ю., Чуркин А.Н., Лапин А.В., Семиглазов С.В. Концепция активных зон ВВЭР-СКД: условия эксплуатации твэлов, конструкция ТВС и кандидатные материалы. Материалы Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, Россия, 2011.

73. Бландинский В.Ю., Колесов В.В., Невиница В.А., Фомиченко П.А., Седов А.А., Фролов А.А., Пустовалов С.Б., Щуровская М.В., Симонов С.С., Песня Ю.Е., Трофимчук В.В., Насонов В.А., Жемков И.Ю. Особенности изменения изотопного состава опытных твэлов реактора типа ВВЭР-СКД при последовательном облучении в быстром и тепловом спектре нейтронов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2022. – Вып. 2. – С.90–96.

74. Трофимчук В.В., Насонов В.А., Песня Ю.Е., Глыва К.И. Расчётная оценка требуемого тепловыделения в опытных твэлах для достижения сверхкритических параметров теплоносителя при их облучении в исследовательском ядерном реакторе // Вопросы атомной науки и техники, Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2021. – Вып. 4. – С. 63-71.

75. Лысиков Б.В., Прозоров В.К. Термометрия и расходомерия ядерных реакторов. (Техника ядерных реакторов. Вып. 17). – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 120 с., ил..

76. Емельянов И.Я., Михан В.И., Солонин В.И. Конструирование ядерных реакторов: Учеб. пособие для вузов [под ред. акад. Н.А. Доллежала]. – М.: Энергоиздат, 1982. – 400 с., ил.

77. Боланд Дж., Приборы контроля ядерных реакторов (внутризонные). прев. с англ. М., Атомиздат, 1973, 224 с.

78. Маркина Н.В., Самсонов Б.В. Измерение температур при облучении материалов, Препринт НИИАР им. В.И. Ленина, НИИАР П-152, Мелекес, 1972.

79. Лысиков Б.В., Прозоров В.К., Олейник Б.Н., Власов В.И., Добровинский И.Е., Фрактовникова А.А., Наливаев В.И., Донецкий В.И., Сафин Ю.А., Уваров В.И., Приймак С.В., Сумерин В.М., Менькин Л.И., Ледов С.П., Маслов И.П. Контрольные эксперименты по исследованию мгновенных эффектов термоэлектрических

преобразователей в условиях реактора ИВВ-2М // Атомная энергия. – 1986. – Т.60. – Вып.1. – С.16-18.

80. Сулаберидзе В.Ш. Средства контроля условий испытаний материалов и изделий атомной техники в исследовательских реакторах, Автореф. дис. докт. техн. наук. – Димитровград: ГНЦ НИИАР, 1999, 200 с.

81. Разина А.П. Тепловая инерция датчиков температуры // ИСУП. – 2020. – № 2. – (86).

82. Сорокин Д.Н., Джусов Ю.П. Динамические характеристики термопар, Препринт ФЭИ-364 Т-17SI5, Обнинск, 1973, 30 с.

83. Обзор ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ. Устройства для контроля и измерения температур, ФГУП «НИИНПО «ЛУЧ» // ИСУП. – 2017. – № 5 (71).

84. Приймак С.В., Олейников П.П., Таубин М.Л., Особенности измерения температуры твэлов в реакторных условиях // Атомная энергия. – 1989. – Т. 67. – Вып. 3. – С. 221-222.

85. Приймак С.В., Игнатъев Д.Н., Конотопов А.Н., Олейников П.П., Солдаткин Д.М., Усачев В.Б. Расчетно-экспериментальный метод оценки погрешности измерения температуры оболочки твэла при имитации аварийных ситуаций // Атомная энергия. – 2011. – Т. 110. – Вып. 3. – С.137-141.

86. Приймак С.В., Зайцев П.А., Солдаткин Д.М., Усачев В.Б. Особенности температурного контроля оболочки твэла реактора ВВЭР-1000 при имитации аварийных ситуаций, Материалы Международной научно-технической конференции ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, Россия, 2013.

87. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. – 12-е изд. Том II: пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 942 с.: ил.

88. Денисенко В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // СТА: Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4. – С. 66-74.

89. 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 // XVII Курчатовская молодежная научная школа : сб. анн. докл., Москва, 2023.

90. Измеритель-регулятор программный ТРМ251. Руководство по эксплуатации. – М: ОВЕН, 2022. – С. 1-104.

91. Коляда В.М., Карасев В.С. Калориметрия излучений ядерного реактора. – М.: Атомиздат, 1974. – 184 с.
92. 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.
93. Кондратьев Г.М., Дульнев Г.Н., Платунов Е.С., Ярышев Н.А., Прикладная физика: Теплообмен в приборостроении. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2003. – 560 с.
94. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры. Ленинград, Энергоатомиздат, 1990. 255 с.
95. Ерак Д.Ю., Яковлев В.В., Мурашов В.Н., Насонов В.А., Буслаев В.С., Можяев А.А., Михин О.В., Ничипоренко Ю.Б. Развитие техники ускоренных радиационных испытаний конструкционных материалов с использованием уникальной установки - реактора ИР-8. Препринт ИАЭ-6648/4, Москва, 2010, 29 с.
96. Мурашов В.Н., Яковлев В.В. и др. Расчетно-экспериментальное исследование температур в центре твэлов с топливом из двуокиси урана. Препринт ИАЭ-2936, Москва, 1978.
97. Dubrovin K.P., Ivanov E.G., Strijov P.N., Yakovlev V.V. The results of postirradiation examinations of VVER-1000 and VVER-440 fuel rods // Journal of Nuclear Materials. – 1991. – Vol. 178. – P. 306–311.
98. Yakovlev V.V., Strijov P.N., Murashov V.N., Johansson J., Terasvirta R.P., Tiihonen O., Ranta-Puska K. Research carried out on WWER-440 type fuel rods in the MR reactor. IAEA-SM-288/64. Improvements in water reactor fuel technology and utilization. Stockholm, 1986, P. 191–206.
99. Strijov P.N., Yakovlev V.V., Dubrovin K.P., Pazdera F., Valach M., Barta O. The improved version of the PIN Code and its Verification. IAEA-TC-657/3.4. (Preston, England, 19–22 September 1988). – Preston, 1988. – P. 2-7.
100. Щеглов А.С. Программа расчета теплофизических характеристик поперечных сечений твэлов ВВЭР-ТОРРА-s. Препринт ИАЭ-6172/4. Москва, 2000.
101. Солодов А.П. Тепломассообмен в энергетических установках, электронный курс [Электронный ресурс: http://twf.mpei.ac.ru/solodov/hmt-ebook_2009/] Дата обращения (20.02.24).

102. Язев В.А., Лукьяненко И.С. Численные методы в Mathcad: учебное пособие для вузов – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 116 с.: ил.

103. Куканов В.Ю., Седов А.А., Поляков П.С. Численное моделирование потока жидкости и теплообмена при сверхкритических давлениях водяного теплоносителя для пучка стержней с проволочным дистанционированием. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2023. – Вып. 2. – С. 64–78.

104. Яковлев В.В., Ерак Д.Ю., Абрамов А.Н., Буслаев В.С., Кочкин В.Н., Михин О.В., Можаяев А.А., Мурашов В.Н., Насонов В.А., Ничипоренко Ю.Б., Песня Ю.Е., Хмызов Н.В., Яшин А.Ф. Техника и методы испытаний конструкционных материалов на исследовательском реакторе ИР-8 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2017. – Вып. 3. – С. 58-64.

105. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [под ред. М.О. Штейнберга]. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.: ил.

106. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

107. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. – М: ГИТТЛ, 1954. – 408 с.

108. Лыков, А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

109. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. – М.: Атомиздат, 1974. 408 с.

110. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М.: Атомиздат, 1986.

111. Pau A., Francisco F., Luis E.H. Modelling FeCrAl cladding thermo-mechanical performance. Part I: Steady-state conditions // Progress in Nuclear Energy. – 2022. – V. 155. – P. 1–13.

112. Бульканов М.Г., Круглов А.С., Певчих Ю.М., Троянов В.М. Внутриреакторные исследования ползучести конструкционных материалов // Атомная энергия. – 1996. – Т. 80. – Вып. 5. – С. 386–391.

113. Тарасиков В.П., Соловьев В.А., Биржевой Г.А., Поролло С.И., Шулепин С.В., Иванов А.А., Леонтьева-Смирнова М.В., Митрофанова Н.М., Науменко И.А., Можанов Е.М. Влияние нейтронного облучения на физико-механические свойства сталей и сплавов отечественных ядерных реакторов. [Электронный ресурс:

https://www.rfbr.ru/rffi/ru/popular_science_articles/o_2092968#463] Дата обращения (15.01.2024).

114. Гаджиев Г.Г., Омаров З.М., Абдуллаев Х.Х., Билалов А.Р., Магомедов М-Р.М., Магомедов Я.Б. Тепловые и электрические свойства сталей ЧС68 // Фазовые переходы, межфазные границы и нанотехнологии. – 2018. – Вып. 3. – С. 30-33.

115. Малыгин В.Б. Эксплуатационные свойства материалов для обоснования проектов твэлов энергетических реакторов. Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2007. 124 с.

116. Гринь П.И., Неустроев В.С., Крюков Ф.Н., Строжук А.В. Интерпретация результатов формоизменения оболочек твэлов модифицированной технологии изготовления из стали марки ЧС68-ид : Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР», 2017, вып. 4, С. 47–59.

117. Кинёв Е.А., Шихалёв В.С., Барыбин А.В. Внутритвэльная коррозия сталей ЭК-164 и ЧС-68 быстрого энергетического реактора на основе диоксида урана. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2015. – Вып. 3. – С. 49-55.

118. Насонов В.А., Песня Ю.Е., Кругликов А.Е. Расчетное обоснование возможности увеличения длительности цикла работы ИР-8 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2017. – Вып. 3. – С. 71-74.