На правах рукописи

Козлов Алексей Владимирович

Разработка усовершенствованного дисперсионного твэла для высокопоточного реактора типа СМ

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в акционерном обществе «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара»

Научный руководитель: кандидат технических наук, старший научный сотрудник Морозов Александр Васильевич

Официальные оппоненты: Троянов Владимир Михайлович, доктор технических наук, главный технолог проектного офиса Новая платформа «АО Концерн Росэнергоатом», г. Москва

Курский Александр Семенович, доктор технических наук, заместитель директора по ядерной, радиационной безопасности и эксплуатации ресурсных центров НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

Ведущая организация: Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» Федеральное государственное бюджетное учреждение Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, г. Гатчина

Защита состоится «20» сентября 2016 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 520.009.06 при Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» по адресу 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» и на сайте www.nrcki.ru.
Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Отзывы и замечания на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 520.009.06, кандидат физико-математических наук А.С. Колокол

Общая характеристика работы

Испытания конструкционных материалов ЯР в исследовательских реакторах с большой плотностью потока нейтронов становятся все более востребованными в связи с необходимостью достижения высоких скоростей накопления повреждающих доз.

В мире работают всего несколько исследовательских реакторов с плотностью потока нейтронов больше 10^{15} нейтр./см^2·с в связи с высокой стоимостью их сооружения и эксплуатации.

В России (г. Димитровград, АО «ГНЦ НИИАР») в настоящее время эксплуатируется исследовательский высокопоточный реактор СМ. Реактор СМ занимает особое место среди отечественных исследовательских реакторов с водяным теплоносителем благодаря следующим особенностям:

– активная зона характеризуется жестким нейтронным спектром, скорость накопления повреждений близка к таковой для реакторов на быстрых нейтронах;

– в реакторе СМ можно организовать облучение образцов при температурах 270÷300 °С, требуемых режимами работы энергетических реакторов ВВЭР и PWR.

Твэл, который используется в реакторе СМ в качестве штатного имеет подтвержденную многолетним опытом эксплуатации хорошую работоспособность при плотности теплового потока с поверхности вплоть до 15 МВт/м^2, температуре воды на поверхности оболочки до 310 °С, скорости воды до 12,4 м/с, средней глубине выгорания до 50 % тяжелых атомов.

Однако, наряду с достоинствами, твэл имеет недостаток – большой захват нейтронов конструкционными материалами, входящими в состав твэла, в первую очередь медью. Уменьшение захвата нейтронов конструкционными материалами позволит улучшить баланс нейтронов в реакторе, увеличить эффективность использования реактора.

Для этого необходимо разработать новый твэл на основе материалов с малым сечением захвата нейтронов, что делает работу **актуальной**.

Разработка твэла для модернизированного реактора СМ проводится на основании «Программы исследований в обоснование модернизации активной зоны реактора СМ с целью расширения его экспериментальных возможностей (второй этап)», утвержденной 04 июня 2002 г. Первым заместителем Министра Атомной энергетики (исх. 16/774 от 14.06.02).

Объектом исследования является стержневой твэл дисперсионного типа с крестообразным профилем поперечного сечения. Оболочка твэла изготовлена из нержавеющей стали, сердечник – виброуплотненные частицы ядерного топлива в матрице из алюминиевого сплава.

Степень разработанности. Штатный твэл реактора СМ используется в высокопоточном исследовательском реакторе СМ с 1964 г и обладает рядом преимуществ, позволяющих ему успешно работать при тепловом потоке до 15 МВт/м^2 и плотности потока быстрых нейтронов $2 \cdot 10^{15}$ нейтр./см^2·с. Возникшая потребность в повышении эффективности реактора и снижении стоимости его эксплуатации потребовали разработки нового твэла. В связи с этим задача разработки твэла на основе материалов с малым сечением захвата нейтронов является уникальной.

Цель и задачи диссертации. Целью является разработка твэла для высокопоточного реактора СМ на основе материалов с малым сечением захвата нейтронов.

Для достижения поставленной цели выполнены следующие задачи:

1. Разработана конструкция и технология твэла;
2. Выбраны материалы из которых изготавливается твэл исходя из условий сохранения работоспособности, надежности, коррозионной стойкости, минимального сечения захвата нейтронов;
3. Проведено измерение теплопроводности топливных композиций трех вариантов твэлов;
4. Выполнен тепловой расчет твэла и расчет его напряженно-деформированного состояния (НДС);

5. Изготовлена партия экспериментальных твэлов в трех вариантах для реакторных испытаний;
6. Выполнен контроль качества твэлов;

Проведен анализ результатов послереакторных исследований с выбором оптимального варианта твэла.

Научная новизна работы:

– Разработана конструкция и технология нового твэла на основе материалов с малым сечением захвата нейтронов.

– Выбраны и обоснованы материалы для изготовления твэла применительно к условиям работы в реакторе СМ. В качестве материала оболочки использована нержавеющая сталь ЭИ-847, в качестве матричного материала использован алюминиевый сплав «силумин». Топливный материал – диоксид урана или интерметаллид урана UAl_3.

– Оптимизирована геометрия твэла, что позволило изготавливать твэлы по новой технологии с требуемыми геометрическими параметрами.

– Проведено измерение коэффициентов теплопроводности новых топливных композиций трех вариантов твэлов, которые использованы для расчета теплового состояния твэла.

– Выполнены расчеты теплового состояния твэла и напряженно-деформированного состояния твэла. Тем самым, обоснована работоспособность твэлов в реакторе СМ.

– Проведены реакторные испытания и послереакторные исследования твэлов СМ на основе материалов с малым сечением захвата нейтронов. Облучение твэлов проведено в петлевом канале отражателя реактора СМ. Все твэлы сохранили герметичность.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– Для модернизации высокопоточного исследовательского реактора СМ разработаны три варианта конструкции и технологии изготовления твэлов на основе материалов с малым сечением захвата нейтронов.

– Использование разработанного твэла в реакторе СМ позволит варьировать компоновку активной зоны для улучшения нейтронно-физических характеристик с целью более эффективного использования реактора.

– В результате физических расчетов реактора, проведенных в АО «ГНЦ НИИАР», установлено, что при использовании нового твэла существенно уменьшится потребление топлива по сравнению со штатным твэлом за счет применения конструкционных материалов твэла с малым сечением захвата нейтронов. Возможно снижение топливных затрат на единицу флюенса быстрых нейтронов в активной зоне в 1,8 раза.

Методология и методы исследования. Для достижения сформулированной цели и поставленных задач применялись различные методы исследования, в частности, использовались неразрушающие методы контроля качества изготовленных изделий: вихретоковый, масс-спектрометрический с применением гелиевого течеискателя, рентгеновский и гамма-абсорбционный. Кроме этого использовался металлографический (разрушающий) метод контроля.

Основные положения, выносимые на защиту:

– Комплекс дореакторных испытаний и исследований в обоснование выбора конструкции и материалов твэла применительно к условиям работы в реакторе СМ.

– Новую технологию изготовления твэла.

– Обоснование работоспособности твэла исходя из результатов расчета теплового состояния и НДС твэла по разработанным методикам.

– Анализ результатов послереакторных исследований твэлов и выбор оптимального варианта твэла.

Степень достоверности. Работа Козлова А.В. выполнена на высоком уровне, использованы корректные методики исследования и расчетов. Измерения проведены на сертифицированном оборудовании, обработка измерений проведена надлежащим образом. Экспериментальные данные, представленные в работе, надежны и подтверждаются воспроизводимостью результатов. Сделанные выводы обоснованы и соответствуют полученным результатам. Достоверность

результатов подтверждается сопоставлением с данными, представленными в научной литературе.

Апробация результатов. Результаты работы докладывались и обсуждались на: 24-м Бочваровском конкурсе ВНИИНМ (г. Москва, 2005); Всероссийской научной конференции молодых ученых и специалистов «Материалы ядерной техники: от фундаментальных исследований к инновационным решениям» (МАЯТ-ОФИЭ-2006, г. Туапсе, 2006); 8-й Российской конференции по реакторному материаловедению (г. Димитровград, 2007); научно-технической конференции АО «ТВЭЛ» «Ядерное топливо нового поколения для АЭС. Результаты разработки, опыт эксплуатации и направления развития» (НТК-2008, г. Москва, 2008); 9-й Российской конференции по реакторному материаловедению (г. Димитровград, 2009); Всероссийской научно-технической конференции «Материалы ядерной техники» (МАЯТ-2010, г. Туапсе, 2010); Международной научной конференции «Исследовательские реакторы в разработке ядерных технологий нового поколения и фундаментальных исследованиях» (г. Димитровград, 2011); 46-ой Зимняя школа ПИЯФ (г. Санкт-Петербург, 2012); Всероссийской научно-технической конференции «Материалы ядерной техники» (МАЯТ-2012, г. Москва, 2012); 6-ом отраслевом семинаре по дисперсионным твэлам (г. Подольск, 2014).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе тезисы 3 докладов, 1 патент, 5 статей в научных журналах, в том числе 2 статьи из перечня ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и библиографического списка литературы, включающего 92 наименования. Работа изложена на 140 страницах машинописного текста, содержащего 77 рисунков, 16 таблиц и 32 формулы.

Личный вклад автора. Автор диссертации Козлов А.В. – исполнитель и один из непосредственных участников следующих работ:

– Выбор оптимальной конструкции твэла на основе материалов с малым сечением захвата нейтронов;

– Разработка технологии нового твэла в трех вариантах;

– Расчет теплового и напряженно-деформированного состояний твэла, находящегося в наиболее напряженных условиях для обоснования работоспособности твэла;

– Авторский надзор на всех этапах изготовления партии экспериментальных твэлов, непосредственное участие в изготовлении твэлов;

– Контроль качества партии изготовленных экспериментальных твэлов, анализ данных и выбор твэлов для реакторных испытаний;

– Анализ результатов послереакторных испытаний.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность работы, сформулированы ее цель, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе диссертации приведен аналитический обзор литературных данных, включающий описание высокопоточного исследовательского реактора СМ и тепловыделяющего элемента (твэла). Предложен путь для повышения эффективности реактора при сохранении основных физических характеристик реактора.

Описана конструкция штатного твэла. Твэл стержневого типа с крестообразным профилем поперечного сечения. Оболочка и заглушки из нержавеющей стали 06Х16Н15М3Б (ЭИ-847). Активная часть твэла – дисперсионная композиция гранул диоксида урана в матрице из медно-бериллиевого сплава, по границам активной части – пробки из медно-бериллиевого сплава. Твэл обладает рядом преимуществ, но при этом его недостаток – большое сечение захвата нейтронов матрицей из медного сплава (сечение захвата медью тепловых нейтронов $\sigma^{\gamma}_{Cu} = 3{,}78 \cdot 10^{-24}$ см^2). Замена медного сплава на алюминиевый сплав ($\sigma^{\gamma}_{Al} = 0{,}23 \cdot 10^{-24}$ см^2) позволит существенно (до

60 %) снизить захват нейтронов конструкционными материалами в активной зоне реактора.

При изготовлении штатного твэла используется технология спекания сердечника при высокой температуре от 1050 до 1140 °С для образования диффузионной связи между гранулами топлива и матрицей, оболочкой и сердечником. Для изготовления твэла на основе материалов с малым сечением захвата нейтронов использована новая технологическая схема виброснаряжения твэла частицами ядерного топлива с последующей пропиткой расплавленным матричным материалом свободного пространства под оболочкой.

Показана актуальность разработки нового твэла для высокопоточного реактора СМ на основе материалов с малым сечением захвата нейтронов. Уменьшение захвата нейтронов позволит улучшить баланс нейтронов в реакторе, увеличить эффективность использования реактора.

Вторая глава диссертации посвящена выбору и обоснованию материалов, разработке конструкции и технологии изготовления твэла.

Разработан твэл на основе материалов с малым сечением захвата нейтронов. В качестве твэла-прототипа использован штатный твэл. Материал матрицы штатного твэла – медный сплав заменен на алюминиевый сплав. Замена матричного материала привела к изменению конструкции и технологии изготовления твэла. Вместо технологии спекания сердечника после виброуплотнения частиц топливной композиции использована технология пропитки расплавленным матричным материалом свободного пространства между виброуплотненными топливными частицами методом литья под давлением в вакуум.

В новом твэле материал оболочки – нержавеющая сталь. Показано, что для данного твэла материал оболочки является оптимальным.

В качестве матричного материала использован силумин – алюминиевый сплав с содержанием кремния ~ 12 % масс. и никеля 2 % масс. Силумин используется в качестве матричного материала в твэлах транспортных реакторов, реакторах малой мощности и плавучих энергоблоков.

В качестве топлива использованы диоксид урана и интерметаллид урана. Данное топливо показало хорошую работоспособность и совместимость с остальными компонентами твэла.

Конструкция твэла разработана в трех вариантах и показана на рисунке 1.

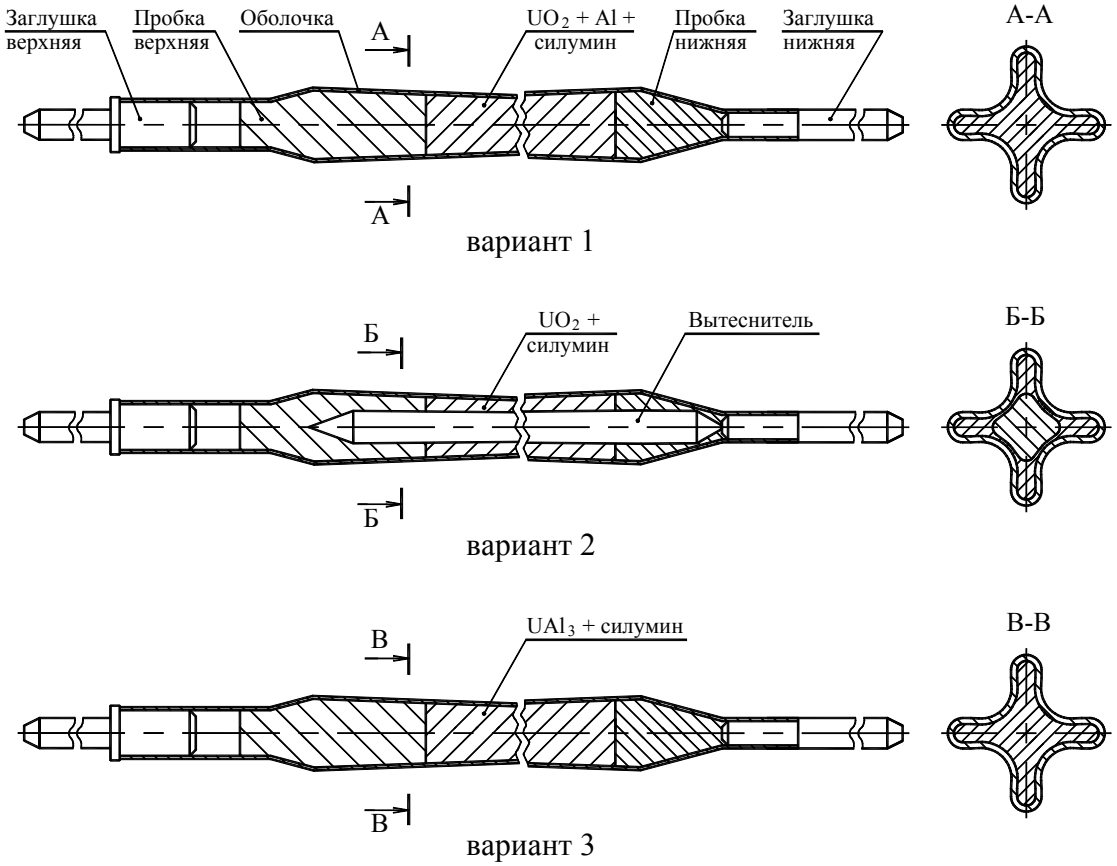


Рисунок 1 - Твэл на основе материалов
с малым сечением захвата нейтронов

В первом варианте твэла топливная композиция состоит из гранул диоксида урана в силуминовой матрице. Для обеспечения требуемой загрузки урана гранулы UO_2 разбавлены крупкой алюминия. Во втором варианте топливная композиция – гранулы UO_2 в матрице из силумина. Для обеспечения требуемой загрузки урана в центре твэла размещен сердечник из алюминиевого сплава. В третьем варианте топливная композиция – интерметаллид урана UAl_3 в силуминовой матрице.

Третья глава посвящена определению характеристик твэла на основе материалов с малым сечением захвата нейтронов. Показано, что замена матрицы

из медного сплава на алюминиевый снижает сечение захвата нейтронов конструкционными материалами твэла на 60 %. Экспериментально определена теплопроводность топливной композиции трех вариантов твэла. Проведены расчеты теплового и напряженно-деформированного состояний твэла для обоснования работоспособности.

В результате оценочного расчета получены макроскопические сечения захвата нейтронов конструкционными материалами твэлов. Данные представлены в таблице 1.

Из данных таблицы 1 видно, что замена штатного твэла на новый приводит к снижению захвата нейтронов конструкционными материалами твэла на ~ 60 %.

Таблица 1 – Результат расчета макроскопического сечения захвата нейтронов конструкционными материалами твэлов, $см^{-1}$

Вид твэла	Значение
Штатный твэл СМ	0,233
Экспериментальный твэл - UO_2+Al+силумин	0,0957
Экспериментальный твэл - UO_2+силумин (с вытеснителем)	0,0959
Экспериментальный твэл - UAl_3+силумин	0,0938

Проведено экспериментальное определение теплопроводности топливной композиции новых твэлов и на основе этих данных проведен расчет теплового состояния твэла.

Исходя из экспериментальных данных допустимая температура для композиции UO_2 + силумин и UAl_3 + силумин составляет 430 °С и 550 °С соответственно.

На основании этих данных обоснована допустимая плотность теплового потока для твэлов. Для варианта 1 и 3 допустимая плотность теплового потока не превышает 9,2 $МВт/м^2$, а для варианта 2 – 12 $МВт/м^2$. Расчеты проведены на момент начала кампании и не учитывают уменьшения теплопроводности сердечника в процессе работы твэла из-за изменения структуры топливной

композиции, накопления продуктов деления, взаимодействия материалов твэла и других факторов.

Проведен расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) твэлов, определены параметры напряженно-деформированного состояния и формоизменения твэлов для максимального выгорания на конец кампании. В ходе расчета получено, что интенсивность напряжений в оболочке не превышает предельной величины, допустимой для оболочки из нержавеющей стали ЭИ-847, пластическая деформация происходит на незначительной части толщины оболочки, а максимальное изменение площади поперечного сечения на конец кампании не превышает 10 %. Данные, полученные в результате расчетов, позволяют утверждать, что твэл сохранит работоспособность в течение всего срока службы.

В четвертой главе диссертации изложена технология изготовления твэлов на основе материалов с малым сечением захвата нейтронов. Приведены результаты изготовления и контроля качества партии экспериментальных твэлов для реакторных испытаний.

Для изготовления твэла применяется технология виброуплотнения частиц (гранул или крупки) топлива с последующим заполнением расплавленным матричным материалом свободного пространства между частицами методом литья под давлением в вакуум.

В качестве оболочки твэла использована труба из нержавеющей стали 06Х16Н15М3Б (ЭИ-847) предварительно спрофилированная в окончательный размер и скрученная спирально вдоль своей оси. С учетом существующих методов профилирования и требований к геометрии твэла оптимизирован профиль поперечного сечения оболочки.

Технология изготовления твэлов следующая:

- изготовление оболочек, заглушек, вытеснителей;
- герметизация первого конца заглушкой с помощью аргонодуговой сварки;
- для варианта №2 размещение в оболочке вытеснителя;
- запрессовка технологической вставки в свободный конец оболочки;

- виброснаряжение твэла

1) засыпка и виброуплотнение нижней пробки;

2) засыпка и виброуплотнение частиц топлива или смеси частиц топлива с частицами материала-разбавителя;

3) засыпка и виброуплотнение верхней пробки;

- пропитка расплавленным матричным материалом свободного пространства под оболочкой;

Режим пропитки показан на рисунке 2.

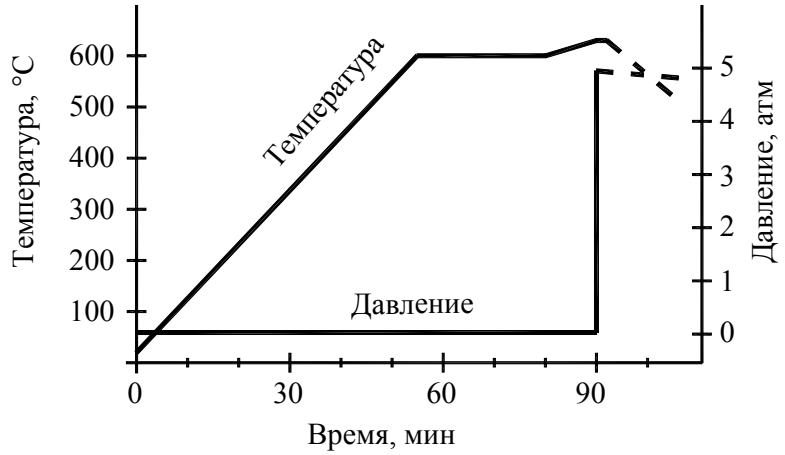


Рисунок 2 – Режим пропитки твэлов СМ

- извлечение технологической вставки;

- герметизация твэла верхней заглушкой с помощью аргонодуговой сварки;

Контроль качества готовых твэлов проведен в следующей последовательности:

- контроль внешнего вида;

- контроль геометрии;

- герметичность твэлов;

- распределение урана по высоте сердечника;

- рентгеновский контроль;

- качество пропитки матричным материалом;

- загрязненность поверхности ураном.

Проведен металлографический контроль твэлов. На рисунке 3 показаны поперечные сечения твэлов трех вариантов.

а б в

а - UO_2 + Al + силумин; б - UO_2 + силумин, в центре размещен вытеснитель; в - UAl_3 + силумин

Рисунок 3 - Макроструктура твэлов трех вариантов

По фотографиям шлифов установлено, что топливные частицы относительно равномерно распределены в сечениях твэлов, оболочка имеет металлургический контакт с топливным сердечником, не обнаружено участков сердечника, непропитанных матричным материалом.

Годные по результатам контроля твэлы вместе с технической документацией предоставлены для реакторных испытаний.

Пятая глава диссертации посвящена реакторным испытаниям экспериментальных твэлов и послереакторным исследованиям облученных твэлов.

Испытания проводились в петлевой установке реактора СМ в специально изготовленных экспериментальных ТВС (ЭТВС). В каждой ЭТВС размещены восемь твэлов одного варианта. В таблице 2 приведены параметры теплоносителя петлевой установки.

В процессе проведения реакторных испытаний герметичность экспериментальных твэлов определялась по показаниям системы КГО и датчиков спецконтроля. Показания датчиков не превышали фоновых значений, что свидетельствует о сохранении герметичности твэлов.

Таблица 2 - Параметры теплоносителя петлевой установки

Параметр	Значение
Средняя скорость теплоносителя, м/с	12,4
Температура на входе, °С	50
Номинальное давление теплоносителя на входе в канал, МПа	4,9

После облучения ЭТВС извлечены из петлевого канала и помещены в бассейн выдержки.

В таблице 3 представлены обобщенные параметры испытаний ЭТВС.

Таблица 3 - Обобщенные параметры испытаний ЭТВС

Параметр	ЭТВС-1	ЭТВС-2	ЭТВС-3
Максимальная температура на поверхности оболочки твэла, °С	238	215	229
Максимальная температура топливной композиции, °С	360	333	391
Максимальная плотность теплового потока, МВт/м^2	6,8	8,0	7,3
Максимальная мощность ЭТВС, кВт	217	257	236
Среднее выгорание ^{235}U, %	50,6	40,7	57,4
Время работы на мощности, эфф.сут.	75	46	86

Проведены послереакторные исследования облученных ЭТВС.

Выполнены осмотр внешнего вида, измерение размеров (объема) твэлов, гамма-сканирование по длине, анализ структуры с помощью металлографии. Все твэлы после испытаний сохранили целостность, форму; искривлений, вмятин, повреждений поверхности не обнаружено.

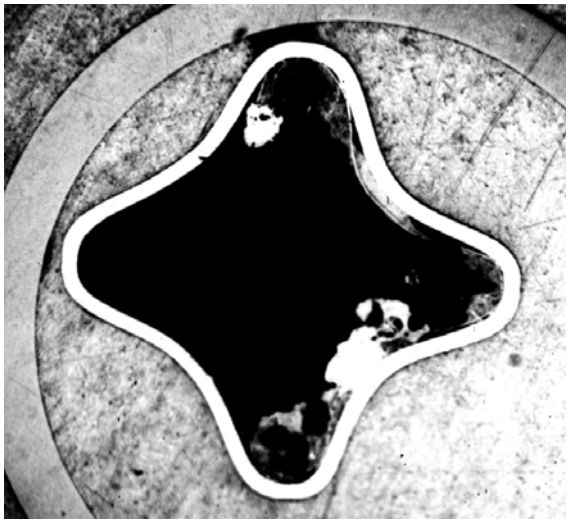
Измерение объема твэлов производилось в защитной камере. Относительная погрешность измерения не превышает 0,2 %. Результаты измерений представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Увеличение объема твэлов, %

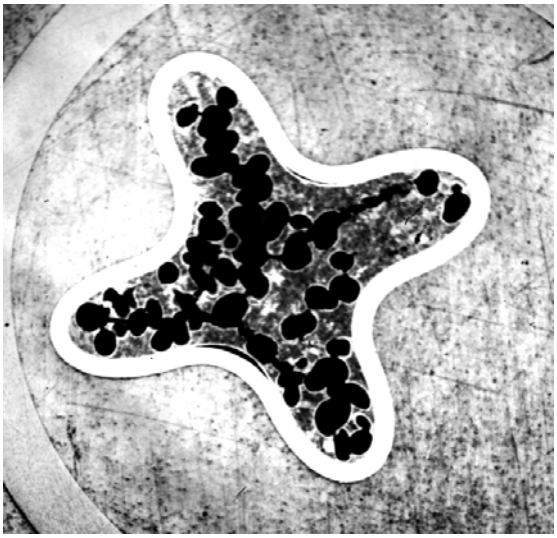
№ твэла	Вариант твэла		
	1	2	3
1	46,4	9,7	5,7
2	12,3	9,8	41,2
3	51,3	9,9	50,6
4	16,1	8,2	5,8
5	11,6	9,1	4,4
6	17,7	9,1	6,3
7	7,3	9,9	6,0
8	52,9	7,5	52,1

Произошло заметное увеличение объема (более 50 %) некоторых твэлов в результате облучения. Такое сильное распухание связано, по-видимому, с условиями испытаний и технологией изготовления твэлов.

На рисунке 4 показаны фотографии макроструктуры для твэлов первого варианта с разным энерговыделением. У твэла № 4, с минимальным энерговыделением, объем увеличился на 16 % по сравнению с исходным значением, у твэла № 3, с максимальным энерговыделением, объем увеличился на 51 %. Поперечное сечение выполнено по середине твэлов.



твэл №3

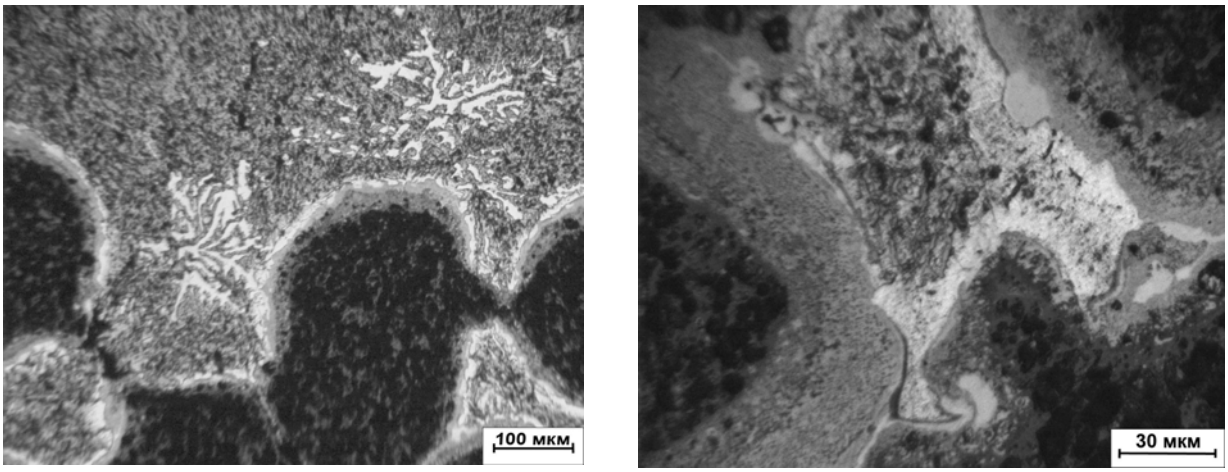


твэл №4

Рисунок 4 – Макроструктура образцов из твэлов первого варианта

Видно, что твэл № 3 сильно изменился в объеме, форма приближена к квадрату. При изготовлении шлифа произошло выкрашивание композиции, что связано с сильным охрупчиванием. У твэла № 4 сохранилась структура сердечника.

На рисунке 5 показана микроструктура твэла № 4. Топливные частицы с характерными порами соответствуют относительно глубокому выгоранию и накоплению продуктов деления. На топливных гранулах образовался светлый ободок – продукт взаимодействия диоксида с силумином. Этот слой взаимодействия составляет, в среднем по всем образцам, 25-30 мкм.



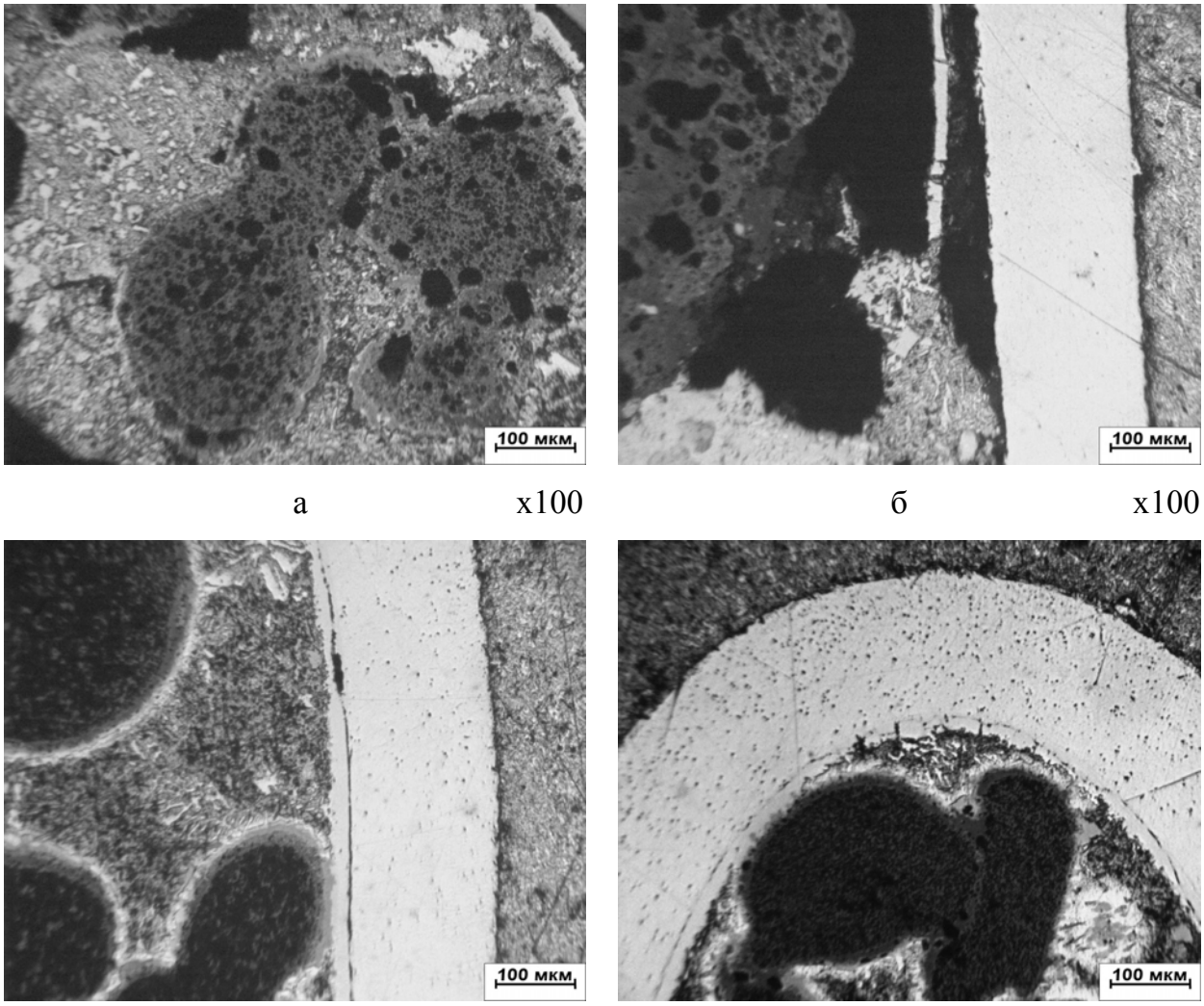
а x100 б x400

Рисунок 5 – Макроструктура твэла № 4

Вблизи оболочки топливный материал сохранился и в твэле № 3, поэтому структуру на границе оболочка-топливо можно сравнить и оценить на обоих твэлах. На рисунке 6 показана микроструктура сердечника вблизи оболочки для твэлов №3 и №4.

В твэле № 3 граница несплошная, с отслоением промежуточного диффузионного слоя взаимодействия между сердечником и оболочкой. В твэле № 4 на большей части периметра диффузионный слой сцеплен с оболочкой. В твэле № 3 можно отметить более развитую пористость в гранулах UO_2 по сравнению с твэлом № 4, а также менее заметный слой взаимодействия гранул с

матрицей. Толщина диффузионного слоя между сердечником и оболочкой составляет примерно 30 мкм во всех исследованных образцах.



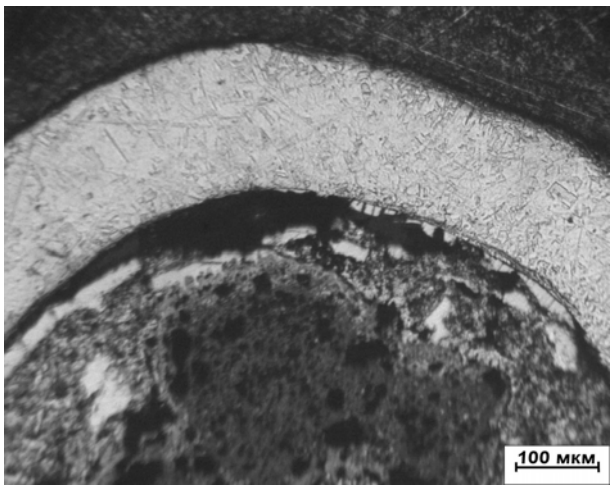
а x100 б x100

в x100 г x100

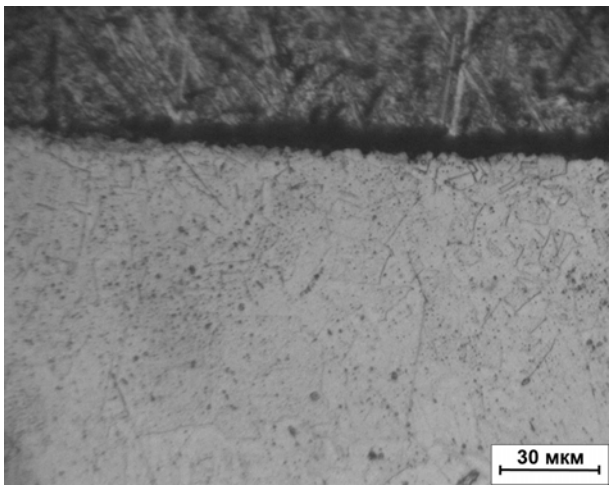
Рисунок 6 – Макроструктура твэла вблизи оболочки
твэла № 3 (а, б) и твэла № 4 (в, г)

Состояние оболочки исследованных твэлов, судя по ее микроструктуре на металлографических шлифах, вполне удовлетворительное (см. рисунок 7).

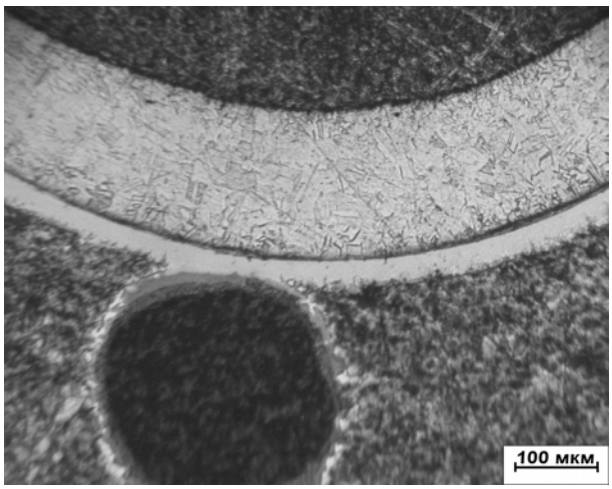
В оболочке отсутствуют трещины, язвы на поверхности. После травления в оболочке наблюдаются характерные для аустенитных сталей двойники, что свидетельствует об отсутствии ее перегрева при испытаниях. На внешней поверхности оболочки не выявлено следов коррозионного повреждения.



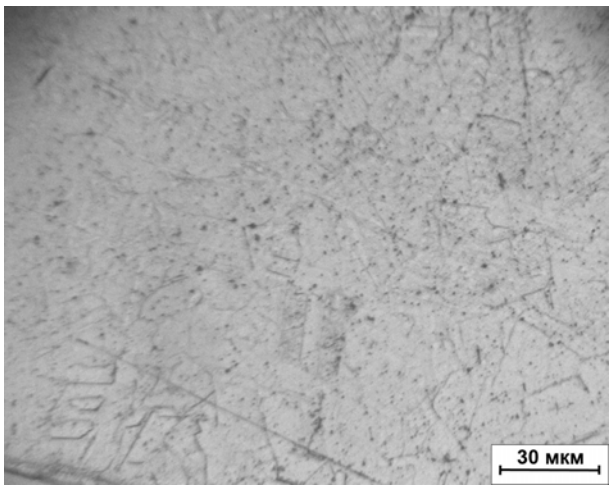
а x100



б x400



в x100



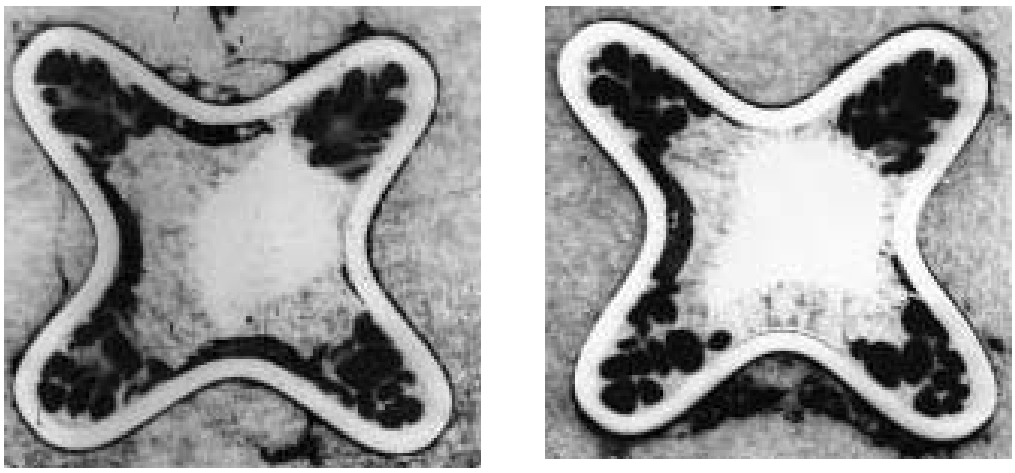
г x400

Рисунок 7 – Микроструктура оболочки в твэлах № 3 (а,б), и № 4 (в,г)

В силу объективных причин (недостаточное финансирование) послереакторные исследования проведены не в полном объеме. Для твэлов второго и третьего варианта приводятся только макроструктура образцов.

На рисунке 8 приведена макроструктура образцов, вырезанных из середины твэлов второго варианта. Твэл № 3 - максимальное энерговыделение, № 4 - минимальное энерговыделение.

Как видно из рисунка, твэлы в поперечном сечении сохранили свою форму, топливная композиция сохранилась, выкрашивания не происходит. На некоторых участках оболочка твэла отслаивается от сердечника. Увеличение объема не превышает 10 %.



твэл № 3, середина твэла твэл № 4, середина твэла

Рисунок 8 – Макроструктура образцов из твэлов № 3 и № 4 второго варианта

На рисунке 9 приведена макроструктура образцов, вырезанных из середины твэлов третьего варианта. Твэл № 3 - максимальное энерговыделение, № 4 - минимальное энерговыделение.

твэл № 3, середина твэла твэл № 4, середина твэла

Рисунок 9 – Макроструктура образцов из твэлов № 3 и № 4 третьего варианта

Пять твэлов третьего варианта из восьми сохранили форму и структуру топливного сердечника. Увеличение объема составило от 4,4 до 6,3 % при среднем выгорании 57,4 % урана-235. Три оставшихся в ЭТВС-3 твэла показали сильное распухание от 41 до 52 %.

На рисунке 9 у твэла № 3 заметное изменение объема с растрескиванием сердечника. Видно сильное взаимодействие топлива с материалом матрицы

вследствие перегрева топливной композиции. Причинами сильного распухания, по-видимому, являются условия испытания и исходная неравномерность распределения топлива в твэле.

Выводы

1. Разработан новый твэл на основе штатного с заменой матрицы из медного сплава на матрицу из алюминиевого сплава. Использована технология виброуплотнения топливных частиц с пропиткой расплавленным матричным материалом свободного пространства под оболочкой вместо прокатки и спекания сердечника при высокой температуре.

2. Проведены расчеты теплового и напряженно-деформированного состояний твэла. Результаты расчетов позволяют утверждать, что оболочка твэла сохранит устойчивость на конец кампании.

3. Изготовлена партия твэлов в трех вариантах исполнения. В качества топлива использован диоксид урана и интерметаллид урана с обогащением 90 %. Оптимизирована геометрия штатного твэла. Оценочный расчет показал, что снижение захвата нейтронов новым твэлом по сравнению со штатным составило ~ 60 %.

4. Проведен контроль качества партии экспериментальных твэлов.

5. Проведен анализ результатов реакторных испытаний экспериментальных твэлов. Все твэлы сохранили герметичность на конец кампании. Обнаружено сильное увеличение объема у некоторых твэлов, связанное, по-видимому, с газовым распуханием из-за повышенной температуры в скоплении топливных частиц, что связано с недостаточной отработкой технологии. Остальные твэлы увеличились в объеме до характерной для этих условий величины у штатных твэлов.

Заключение

Полученный комплекс данных по изготовлению, реакторным испытаниям и послереакторным исследованиям дает возможность обосновать выбор оптимального варианта твэла.

Наиболее технологичным является третий вариант, интерметаллид урана в матрице из алюминиевого сплава. Оставшиеся варианты требуют отработки и применения дополнительных технологических приемов.

Реакторные испытание показали удовлетворительную работоспособность твэлов в заданных условиях, все твэлы сохранили герметичность.

Послереакторные исследования экспериментальных твэлов показали сильное распухание некоторых твэлов. Связано это с неравномерностью распределения топлива в матрице вследствие недостаточной отработки технологии изготовления твэлов. Если не рассматривать твэлы с аномально высоким распуханием, то минимальное распухание очевидно у твэлов третьего варианта твэла (см таблицу 4). При этом твэлы третьего варианта достигли выгорания более 57 %, тогда как твэлы первого и второго варианта ~ 50 % и 40 % соответственно.

Стоимость интерметаллидного топлива, изготовленного на ПАО «МСЗ» (включая стоимость сырья и услуг сторонних организаций по изготовлению сырья) ниже на 14 % по сравнению со стоимостью диоксидного топлива одинакового обогащения.

Все вышесказанное свидетельствует в пользу выбора третьего варианта твэла на основе материалов с малым сечением захвата нейтронов, как оптимального по конструкции, технологии, экономике и работоспособности. При этом необходимо отработать технологию снаряжения твэла с целью исключить неравномерность распределения топлива в матрице твэла. В дальнейшем необходимо провести полномасштабные испытания сборки в активной зоне реактора.

Использование результатов диссертационной работы и внедрение твэла на основе материалов с малым сечением захвата нейтронов позволит улучшить баланс нейтронов в активной зоне реактора, увеличить эффективность использования реактора.

Решение этих задач позволит существенно уменьшить потребление топлива за счет применения твэла на основе материалов с малым сечением захвата нейтронов.

Разработанный твэл также может быть использован в реакторе ПИК, г. Гатчина, а так же других высокопоточных реакторах.

Список опубликованных работ по теме диссертации:

1. Разработка экспериментального твэла с малым вредным поглощением нейтронов для модернизированного реактора СМ [Текст] / А.В. Морозов, В.С. Волков, С.А. Ершов, А.В. Козлов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: материаловедение и новые материалы. - 2008. - Вып.1 (70). - С.5-12.
2. Разработка твэла с малым вредным поглощением нейтронов для высокопоточного исследовательского реактора СМ [Текст] / В.С. Волков, А.В. Морозов, А.В. Козлов [и др.] // Атомная энергия. - 2009. - Том 106. - Вып. 6. - С.314-318.
3. Разработка экспериментального твэла с малопоглощающими нейтроны материалами для модернизированного реактора СМ [Текст] / А.В. Козлов, А.В. Морозов, В.С. Волков, С.А. Ершов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: материаловедение и новые материалы. - 2012. - Вып.1 (72). - С.26-32.
4. Поведение под облучением в реакторе СМ дисперсионной топливной композиции на основе частиц диоксида урана в алюминиевой матрице [Текст] / В.Ю. Шишин, И.Ф. Гильмутдинов, А.В. Козлов, С.А. Ершов // Материалы школы-конференции для молодых ученых и специалистов «Материалы перспективных реакторных установок: разработка и применение», 29 октября-2 ноября 2012, Звенигород. – 2012. - С.111-113.
5. Исследование опытных дисперсионных твэлов с матрицей на основе алюминия для высокопоточных исследовательских реакторов [Текст] / В.Ю. Шишин, И.Ф. Гильмутдинов, А.В. Козлов [и др.] // Атомная энергия. - 2015. - Том 118. - Вып. 2. - С.80-85.
6. **Пат. 2389089 Российская Федерация, МПК G21C3/20, G21C21/02.** Тепловыделяющий элемент для ядерных реакторов (варианты) и способ его изготовления (варианты) [Текст] / Ватулин А.В., Волков В.С., Ершов С.А., Козлов А.В., Морозов А.В., Симонов А.П., Сорокин В.И.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара» (RU). - N 2008132912/06(041318); заявл. 08.08.08; опубл. 27.11.09.