

На правах рукописи
УДК 621.039.5



Старков Владимир Александрович

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ
РЕАКТОРА СМ

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Димитровград-2015

Работа выполнена в Государственном научном центре Научно-исследовательском институте атомных реакторов

Научный консультант:

Калыгин Владимир Валентинович

Доктор технических наук, профессор,
АО «ГНЦ НИИАР»,
Заместитель директора
по науке и инновациям

Официальные оппоненты:

Курский Александр Семенович

Доктор технических наук,
НИЦ «Курчатовский институт»,
Зам. директора по ядерной безопасности

Иванов Валентин Борисович

Доктор технических наук,
заслуженный деятель науки РФ,
АО «ВНИИНМ им. А.А. Бочвара»
Генеральный директор

Бушуев Анатолий Васильевич

Доктор физико-математических наук,
профессор,
НИЯУ «МИФИ»
профессор кафедры № 5

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

Защита состоится « 17 » ноября 2015 года в 14 час. 00 на заседании диссертационного совета Д520.009.06 в Научном Исследовательском Центре «Курчатовский институт». 123182, г. Москва, пл. Курчатова, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального Исследовательского Центра «Курчатовский институт» и на сайте www.rncki.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2015г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
Д.т.н., профессор



Мадеев В.Г.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. *Энергетической стратегией России на период до 2030 года и Концепцией социально-экономического развития РФ на период до 2020 года (раздел Атомный энергопромышленный комплекс)* в качестве основных задач атомной энергетики РФ отмечены продление срока эксплуатации энергоблоков, увеличение экспортного потенциала ядерных технологий России, ускоренное развитие сопряженных отраслей, в том числе ядерной медицины. Создание новых радиационнотойких материалов имеет исключительно важное значение не только для продления срока эксплуатации энергоблоков, но и при разработке инновационных проектов ядерных энергетических установок различного назначения. Рост потребностей и номенклатуры радионуклидной продукции, в том числе с высокой удельной активностью, расширение российского присутствия на мировом рынке также требует увеличения производительности наработки изотопной продукции (ИП).

Снижение себестоимости продукции, для высокопоточных реакторов прежде всего топливной составляющей затрат, диктует необходимость улучшения топливного цикла (ТЦ) реактора.

Реактор СМ обладает рядом достоинств, которые могут быть использованы для решения указанных задач:

- в отличие от других исследовательских реакторов с водяным охлаждением активная зона реактора СМ характеризуется жестким нейтронным спектром и высоким удельным энерговыделением, поэтому скорость накопления повреждений материалов быстрыми нейтронами в облучательных ячейках топливной части активной зоны (а.з.) близка к скорости повреждения в реакторах на быстрых нейтронах;
- в отличие от исследовательских реакторов на быстрых нейтронах с охлаждением натрием, для которых характерны высокая температура теплоносителя, сложность обеспечения водной среды в облучательном объеме, в реакторе СМ возможно организовать инструментированные облучения материалов в режимах, соответствующих условиям их работы в реакторах ВВЭР, PWR;
- в активной зоне реактора, наряду с нейтронами высоких энергий, присутствуют нейтроны с меньшими, вплоть до тепловой, энергиями, что позволяет параллельно с накоплением повреждающей дозы накапливать ядра-трансмутанты, обеспечивая нужное соотношение скоростей этих процессов. Наличие трансмутации ядер крайне важно: во многих реальных случаях используемый материал работает именно в таких условиях;
- высокие значения плотности потоков резонансных и тепловых нейтронов в активной зоне обеспечивают высокую скорость наработки изотопной продукции.

Имеющиеся в активной зоне реактора ампульные облучательные каналы малого (~12 мм) диаметра не позволяли использовать достоинства реактора в полной мере из-за отсутствия возможности размещать облучательные устройства с большим числом образцов и мишеней. Увеличение числа и диаметра экспериментальных каналов в активной зоне является необходимым условием для проведения испытаний новых реакторных материалов в большом объеме и увеличения наработки изотопной продукции.

Таким образом, расширение экспериментальных возможностей реактора: организация и обеспечение условий для проведения большого объема ускоренных высокодозных испытаний реакторных материалов в активной зоне и наработки изотопной продукции, в т.ч. с высокой удельной активностью, при улучшении технико-экономических показателей реактора является актуальной задачей.

Цель работы. Разработка, научно-методическое обоснование и практическая реализация технических решений по расширению экспериментальных возможностей активной зоны с созданием новых экспериментальных объемов и улучшению топливного цикла реактора.

Для достижения этой цели автор решал следующие задачи:

- обоснование концепции модернизации активной зоны, предусматривающей увеличение экспериментальных объемов в активной зоне примерно в четыре раза при улучшении технико-

экономических показателей реактора на первом этапе, повышение плотности потока нейтронов в экспериментальных каналах и дальнейшее улучшение топливного цикла реактора – на втором этапе модернизации активной зоны с применением нового твэла;

- разработка расчетно-методического обеспечения и его тестирование для решения задач модернизации активной зоны;

- проведение расчетных исследований характеристик, комплексный анализ и систематизация результатов исследований для штатной активной зоны реактора СМ. Разработка технических предложений по увеличению экспериментальных объемов в активной зоне реактора. Расчетное обоснование характеристик модернизированной по первому этапу активной зоны, экспериментальных каналов и эксплуатационных характеристик реактора;

- обоснование режимов, безопасности и расчетное сопровождение реакторных испытаний модифицированных опытных твэлов и тепловыделяющих сборок (ТВС) с повышенным содержанием урана, обоснование их работоспособности для модернизированной активной зоны;

- предтестовое обоснование и расчетное сопровождение процесса перевода активной зоны реактора СМ на модифицированное топливо (реализация первого этапа модернизации активной зоны);

- проведение расчетных исследований по оптимизации конструкции нового твэла с малым вредным поглощением (МВП твэла) с матрицей на основе алюминиевого сплава, по обоснованию способа размещения твэлов и стержней с выгорающим поглотителем (СВП) в тепловыделяющей сборке. Определение характеристик экспериментальных каналов и активной зоны, модернизированной по второму этапу, с использованием этого твэла;

- обоснование режимов и расчетное сопровождение петлевых испытаний МВП твэлов.

Научная новизна. Решение поставленных задач позволило получить ряд результатов, определяющих научную новизну работы.

1. Обоснованы основные концептуальные решения модернизации активной зоны высокопоточного исследовательского реактора СМ для увеличения экспериментальных объемов, повышения плотности потока нейтронов в них и улучшения топливного цикла реактора.

2. Разработано программно-методическое обеспечение для проведения инженерных поисковых и прецезионных расчетов нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик активной зоны при решении задач модернизации.

3. Получены теплофизические и нейтронно-физические характеристики активной зоны реактора СМ, проведен их комплексный анализ, установлены и систематизированы закономерности формирования поля тепловыделения по объему активной зоны при перегрузках топлива и в процессе кампании реактора; предложены обоснованные технические решения по увеличению экспериментальных объемов в массиве активной зоны, получены и исследованы характеристики новой компоновки активной зоны, модернизированной в рамках первого этапа.

4. Обоснована конструкция, материальный состав, работоспособность и эксплуатационная надежность модифицированных твэлов и ТВС в новых условиях модернизированной активной зоны в объеме первого этапа модернизации.

5. Обоснован алгоритм и проведено расчетное сопровождение перевода реактора на модифицированное топливо, в результате которого реализован первый этап модернизации активной зоны.

6. Обоснованы конструкция, материальный состав экспериментальных твэлов с малым вредным поглощением нейтронов и стержней с выгорающим поглотителем, их оптимальное размещение в тепловыделяющей сборке в новых условиях модернизированной активной зоны в объеме второго этапа модернизации. Определены характеристики экспериментальных каналов и активной зоны в различных компоновках с использованием МВП твэла.

7. Обоснованы режимы, проведены петлевые испытания дисперсионного топлива с матрицей на основе алюминия (МВП твэлов) при плотности теплового потока выше 7 МВт/м^2 до значений среднего выгорания выше 50%.

Практическая значимость работы:

- В результате проведенных исследований модифицированных твэлов с повышенной загрузкой урана и полномасштабных ТВС в рамках первого этапа модернизации обоснована их работоспособность при нагрузках до 15 МВт/м^2 , до средних значений выгорания топлива в ТВС 50%, что позволило осуществить перевод реактора на такое топливо и, тем самым, завершить первый этап модернизации активной зоны реактора СМ.
- Предложенный алгоритм перевода реактора на модифицированное топливо и проведенное расчетное сопровождение перевода, в результате которого был реализован первый этап модернизации активной зоны, позволили расширить экспериментальные возможности реактора. Компонировка и характеристики активной зоны реактора СМ были изменены таким образом, чтобы в ней можно было разместить до двух петлевых каналов большого диаметра и до четырех ампульных каналов увеличенного диаметра для испытания материалов и наработки изотопной продукции. При этом экспериментальный объем в нейтронном поле с большой долей высокоэнергетической компоненты увеличился в 4 раза, годовое потребление ТВС снижено на 22 %, урана на 9 %; при работе реактора без петлевых каналов, (проектной активной зоны такой режим предусмотрен) использование модифицированного топлива позволило увеличить экспериментальный объем в а.з. в 1,7 раза, значительно улучшить топливоиспользование реактора: снизить годовую потребность в тепловыделяющих сборках на 27 %, в высокообогащенном уране на 15 %.
- Результаты расчетных и экспериментальных исследований вошли в состав технических проектов модифицированных твэла и тепловыделяющей сборки трех конструктивных исполнений, технического проекта активной зоны, модернизированной по первому этапу, позволили провести межведомственные испытания изделий и поставить их на серийное производство.
- С использованием результатов расчетных исследований нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик активной зоны на основе МВП твэла (второй этап модернизации) обоснованы режимы и проведены реакторные испытания экспериментальных МВП твэлов трех модификаций, проработавших без нарушения герметичности в условиях модернизированной активной зоны.

Достоверность и обоснованность выводов и результатов работы подтверждены:

- анализом и обобщением эксплуатационных данных реактора СМ, их использованием при тестировании применяемых расчетных методик и программ, а также экспериментальными исследованиями на реакторе;
- результатами испытаний модифицированных и МВП твэлов в петле ВП-1 и полномасштабных ТВС с модифицированным топливом в активной зоне реактора СМ;
- реализацией первого этапа модернизации активной зоны СМ и переводом реактора на модифицированное топливо.

Апробация работы.

Основные результаты работы были представлены и обсуждались на:

- XII ежегодной конференции ЯО РФ «Исследовательские реакторы: наука и высокие технологии», Димитровград, 2001;
- VII Российской конференции по радиационному материаловедению, Димитровград, 8-12 сентября, 2003;
- отраслевом совещании: «Использование и эксплуатация исследовательских реакторов», Димитровград, 2005;
- семинаре МАГАТЭ, ноябрь 2006, Вена, Австрия;
- международной конференции «Исследовательские реакторы в 21 веке», 21-24 июня 2006 г, Москва, НИКИЭТ;

- международной конференции «Экспериментальное обоснование проектных, конструкторских и технологических решений в инновационных разработках ядерной энергетики» 4-8 декабря 2006 г. Дмитровград;
- международной конференции по исследовательским реакторам: «Безопасное управление и эффективное использование». Сидней, Австралия, 5-7 ноября 2007;
- международной конференции «Научные проблемы развития атомной энергетики на современном этапе». Минск, Беларусь, 13-15 ноября 2007;
- «Зимней школе ПИЯФ», Гатчина, 2000г., 2008г., 2010г.

Публикации.

По результатам исследований опубликовано более 50 научных работ в российских и зарубежных журналах, в сборниках докладов международных и российских конференций, брошюрах и сборниках трудов НИИАР, в том числе 14 в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях. Предложенные в работе решения защищены двумя патентами РФ. Материалы диссертации вошли в состав технических проектов модифицированных твэла, ТВС, модернизированной активной зоны реактора СМ. Разработанные автором при выполнении исследований расчетные инженерные методики явились основой двух изданных учебных пособий для ВУЗов (специальность 141401.65 «Ядерные реакторы и материалы»).

Личный вклад

Лично автором и при его непосредственном участии в качестве ответственного исполнителя, научного руководителя исследовательских работ по модернизации активной зоны реактора СМ, начальника физико-технической лаборатории, научного руководителя реактора СМ по вопросам ядерной безопасности получены расчетные и экспериментальные результаты, представленные в диссертации:

- обоснованы концептуальные решения по модернизации активной зоны реактора СМ;
- разработано, реализовано и проведено тестирование на эксплуатационных данных инженерного программно-методического обеспечения для поисковых расчетных исследований в обоснование выбора компоновочных решений модернизированной активной зоны, основанное на физической аппроксимации параметров реактора; разработана методика детальных (потвэльных) расчетов нейтронно-физических и теплофизических характеристик активной зоны, позволяющая исследовать изменения локальных теплофизических условий работы тепловыделяющих элементов и с использованием которой создана прецезионная трехмерная расчетная модель реактора;
- предложен методический подход к расчетному определению распределения выгорания и тепловыделения в активной зоне СМ, выполнен системный детальный анализ изменения распределения тепловыделения в активной зоне при частичных перегрузках топлива и в процессе кампании реактора;
- проведено обоснование характеристик модифицированного топлива, исследовано распределение тепловыделения в модернизированной по первому этапу активной зоне и обосновано значение номинальной мощности реактора; изучены нейтронно-физические характеристики экспериментальных каналов и активной зоны с различным числом установленных петлевых каналов;
- определены режимы при проведении комплекса реакторных и петлевых испытаний модифицированного топлива, по результатам которых обоснована его работоспособность в условиях модернизированной активной зоны реактора;
- предложен сценарий перевода реактора на модифицированное топливо с использованием штатной процедуры перегрузки топлива, осуществлено сопровождение перевода реактора на модифицированное топливо;
- проведено расчетное обоснование содержания топлива в твэле с малым вредным поглощением для двух компоновок модернизированной активной зоны; предложен способ размещения и обоснованы параметры стержней с выгорающим поглотителем в ТВС;
- изучены нейтронно-физические характеристики экспериментальных каналов и модернизированной активной зоны базовой компоновки с использованием МВП твэла и СВП;

изучены нейтронно-физические характеристики экспериментальных каналов и активной зоны с форсированными параметрами, получены данные и проведен сравнительный анализ эксплуатационных характеристик реакторов с различными компоновками активной зоны;

- обоснован выбор тепловой нагрузки опытных твэлов с малым вредным поглощением трех конструктивных исполнений и проведено сопровождение петлевых испытаний МВП твэлов.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Результаты расчетных исследований в обоснование положений концепции модернизации активной зоны СМ.
2. Программно-методическое обеспечение: комплекс потвэльного расчета нейтронно-физических характеристик реактора и тепловой нагрузки топлива; аппроксимационная методика и инженерная программа расчета эксплуатационных характеристик реактора.
3. Результаты анализа закономерностей формирования поля тепловыделения в активной зоне реактора СМ при перегрузках и в процессе кампании реактора, результаты расчетных исследований характеристик модернизированной по первому этапу активной зоны, экспериментальных каналов и режимов работы модифицированных твэлов и ТВС.
4. Результаты комплекса расчетно-экспериментальных исследований в обоснование работоспособности модифицированных твэлов и ТВС.
5. Результаты обоснования возможности перевода реактора на модифицированное топливо с использованием штатной процедуры перегрузок топлива и сопровождения перевода.
6. Результаты исследований нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик модернизированной активной зоны и ЭК с использованием МВП твэлов и СВП.
7. Результаты обоснования режимов, сопровождения и результаты петлевых испытаний экспериментальных МВП твэлов трех модификаций для условий модернизированной активной зоны.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 128 наименований. Работа изложена на 283 страницах, включает 144 рисунка и 67 таблиц.

Содержание работы.

Во **введении** обосновывается актуальность работы, сформулирована ее цель, задачи, новизна и практическая значимость.

Имеющиеся в активной зоне реактора ампульные облучательные каналы малого (~12 мм) диаметра в специальных топливных сборках с высотой активной части 350 мм использовались, в основном, для накопления отдельных радионуклидов и, в ограниченных случаях, для облучения образцов материалов ядерных и термоядерных реакторов нейтронами с энергией $E \geq 0,1$ МэВ и плотностью потока $2 \times 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Такие размеры каналов не позволяют использовать достоинства реактора в полной мере из-за отсутствия возможности размещать облучательные устройства с большим числом образцов или мишеней, регулировать температурный и водно-химический режим, использовать необходимую инструментовку. Таким образом, увеличение числа экспериментальных каналов в активной зоне, их диаметра, а также увеличение скорости набора повреждающей дозы в экспериментальных объемах при сохранении или улучшении технико-экономических показателей реактора, является важной задачей расширения объемов испытаний новых материалов и наработки изотопной продукции.

В **первой** главе дается краткое описание реактора СМ, сформулирована и обоснована концепция модернизации его активной зоны [1-8].

Реактор СМ представляет собой корпусной водо-водяной реактор ловушечного типа с промежуточным спектром нейтронов в активной зоне. Активная зона реактора СМ в сечении представляет собой квадрат 420×420 мм (6×6 ячеек) высотой 350 мм с боковым отражателем из металлического бериллия высотой 500 мм (рисунок 1). В активной зоне размещаются с шагом 70 мм 28 ТВС квадратного сечения с размером стороны 69 мм. Четыре центральные ячейки а.з. отведены для размещения центрального замедляющего блока (ЦЗБ), обеспечивающего максимальную плотность потока тепловых нейтронов и позволяющего

получать в процессе облучения изотопы далеких трансурановых элементов, а также различных нуклидов с высокой удельной активностью, и центрального компенсирующего органа (ЦКО). В бериллиевых вкладышах, окружающих центральный замедляющий блок, размещены 4 стержня аварийной защиты. В четырех угловых ячейках располагаются компенсирующие органы (КО) системы управления и защиты реактора. Основные облучательные объемы сосредоточены в боковом отражателе реактора в виде тридцати вертикальных экспериментальных каналов, расположенных на различном расстоянии от активной зоны. Пять вертикальных каналов могут быть подключены к низкотемпературной водяной петле, рассчитанной на давление 4,9 МПа и температуру теплоносителя до 60°C, три канала могут входить в состав высокотемпературной водяной петли, рассчитанной на давление 20 МПа и температуру теплоносителя до 330°C. В части рабочих ТВС путем удаления 28 твэлов установлены каналы диаметром 12,5×0,3 мм для облучения образцов нейтронами жесткого энергетического спектра.

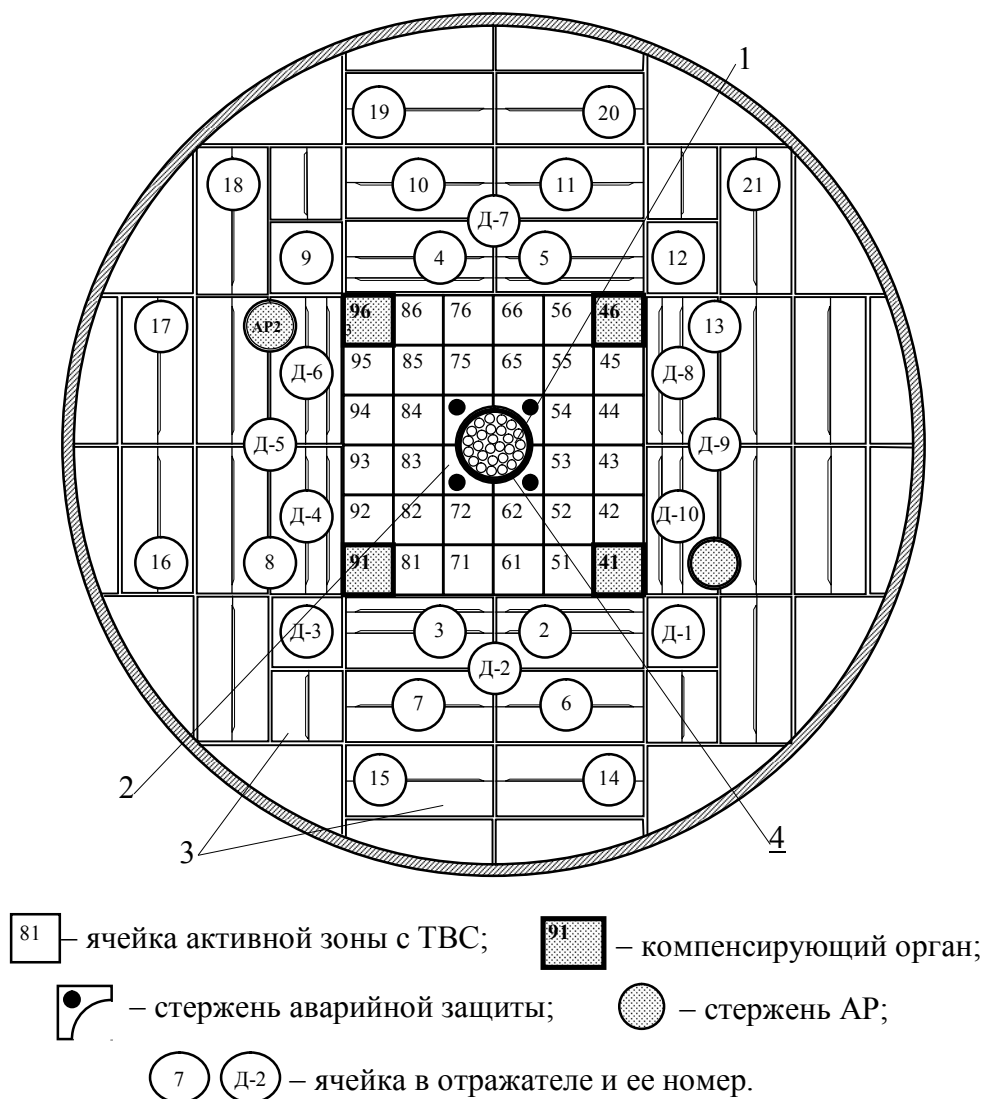


Рисунок 1 – Картограмма активной зоны и отражателя реактора СМ:

- 1– центральный блок с облучаемыми объемами; 2– бериллиевый вкладыш;
 3– бериллиевый блок отражателя; 4– центральный компенсирующий орган.

Одним из важнейших достоинств реактора СМ является возможность проведения высокодозных облучений материалов внутри активной зоны, где имеет место высокая

плотность потока быстрых нейтронов. Скорость накопления повреждений в облучаемых образцах сравнима с таковой для образцов, облучаемых в реакторах на быстрых нейтронах (таблица 1).

Таблица 1 – Повреждающая доза материалов в активных зонах СМ и БОР-60 (сна/год)

Место облучения	Химический элемент					
	Al	Ti	Fe	Ni	Zr	Mo
Пятый ряд ТВС активной зоны БОР-60 (ячейка Д-23)	42	20	20	22	24	16
Активная зона СМ:						
• ячейка 52	61	36	32	34	35	23
• ячейка 44	40	23	21	23	23	16

Так как в активной зоне реактора СМ, наряду с нейтронами высокой энергии, присутствуют также нейтроны с меньшими энергиями, вплоть до тепловой, то при облучении образцов в активной зоне СМ, помимо накопления повреждающей дозы, накапливаются ядра - трансмутанты, образующиеся при захватах медленных нейтронов (таблица 2). Этот процесс крайне важен, так как во многих реальных случаях используемый материал работает именно в таких условиях.

Таблица 2 – Накопление водорода/гелия (аррм/год) в активной зоне реакторов СМ и БОР-60

Место облучения	Химический элемент					
	Al	Ti	Fe	Ni	Zr	Mo
Пятый ряд ТВС активной зоны БОР-60 (ячейка Д-23)	42/8	32/1	72/3	1460/59	3/1	18/1
Активная зона СМ:						
• ячейка 52	130/29	91/5	188/8	2730/715	8/1	51/3
• ячейка 44	84/19	58/3	124/5	1833/500	5/1	34/2

С целью увеличения облучательных объемов в топливной части активной зоны кроме имеющихся экспериментальных объемов в центральном замедляющем блоке (рисунок 2, позиция 7) и в тепловыделяющих сборках (рисунок 2, позиция 1), в модернизированной активной зоне дополнительно предусматривается установка вместо рабочих сборок двух экспериментальных петлевых каналов (ЭПК) (рисунок 2, позиция 3) с устройствами для облучения образцов конструкционных материалов в водяном теплоносителе при температуре до 330°C и давлении до 20 МПа. Испытания в петлевых каналах должны проводиться с контролем параметров испытаний и регулировкой части из них (расход, давление, температура, ВХР).

Дополнительно в активной зоне размещаются 4 ТВС с ампульными каналами (АК) Ø 20–30 мм (рисунок 2, позиция 2). Эти экспериментальные объемы предназначены для ампульных облучений образцов материалов и наработки изотопной продукции. В результате экспериментальный объем в базовой компоновке модернизированной активной зоны (рисунок 2б) увеличивается по сравнению со штатной в ~ 4,1 раза.

Высокая теплопроводность топливной композиции с использованием медной матрицы в сочетании с прочным диффузионным сцеплением сердечника со стальной оболочкой

обеспечивают приемлемую температуру в штатных твэлах СМ при плотности теплового потока с их поверхности, достигающей величины 12–15 МВт/м². Они остаются работоспособными при проектных теплотехнических параметрах до выгорания 50% и выше. Но это достигается, как мы видим, применением материалов, сильно поглощающих нейтроны, особенно в низкой энергетической области. Разработка нового твэла с применением слабо поглощающих нейтроны материалов, способного работать при традиционной для реактора СМ плотности потока тепла на поверхности твэлов, является технически сложной и долговременной задачей. Поэтому было предложено проводить модернизацию в два этапа.

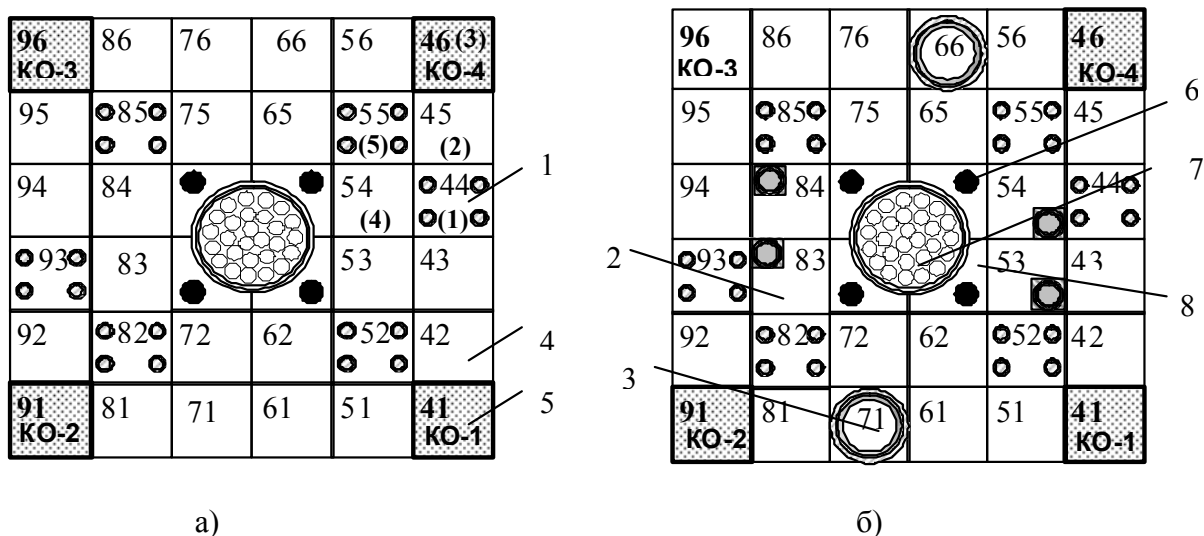


Рисунок 2 – Компоновки штатной а) (32 РТВС) и модернизированной б) (базовая компоновка, 30 РТВС) активных зон реактора СМ: 1 – топливная сборка с ампульными каналами $\varnothing 12,5$ мм; 2 – топливная сборка с ампульными каналами $\varnothing 24,5$ мм (до четырех шт.); 3 – петлевой канал $\varnothing 64$ мм (до двух каналов); 4 – топливная сборка; 5 – компенсатор реактивности; 6 – стержень аварийной защиты; 7 – канал в ЦЗБ $\varnothing 12$ мм; 8 – вкладыш из металлического бериллия.

Цифрами (1) – (5) на рисунке 2а показаны типовые ячейки активной зоны.

На первом этапе было запланировано перейти на использование ТВС с чехлом из сплава 110 вместо нержавеющей стали и увеличить загрузку урана-235 в активной зоне. В работе показано, что увеличение загрузки за счет уменьшения среднего выгорания топлива в модернизированной активной зоне невозможно в рамках условий постановки задачи: при снижении выгорания топлива с 14,0% до 11,3%, необходимого для сохранения продолжительности кампании, начальный запас реактивности превышает значение, которое может быть скомпенсировано существующей системой управления и защиты реактора с необходимым запасом по требованиям ядерной безопасности. Кроме того ухудшаются экономические показатели реактора: удельное годовое потребление рабочих ТВС и урана увеличиваются на (10–13)%. Напротив, увеличение содержания урана в твэле повышает выгорание топлива, снижает темп потери реактивности на выгорание. При содержании 6 г U-235 в твэле и выгорании топлива 14,7% в начале кампании годовая потребность в рабочих ТВС (РТВС) уменьшается по сравнению со штатной компоновкой активной зоны на 22%, расход урана на 9%. Запас реактивности составляет 6,6% и компенсируется штатной СУЗ.

Таким образом было показано, что оптимальным способом компенсации потерь реактивности от увеличения экспериментальных объемов в активной зоне является увеличение содержания урана-235 до 6 г в твэле. Дополнительной мерой можно считать замену стальных чехлов ТВС на чехлы из сплава Э-110.

Создание нового стержневого твэла с сечением крестообразного профиля, матрицей на основе материала с низким сечением радиационного захвата нейтронов и ураноемким топливом, а также разработка новых ТВС на его основе должны быть предусмотрены на втором этапе модернизации. На основании проведенного анализа проблем, связанных с выбором

материалов, обеспечивающих одновременно минимальное вредное поглощение нейтронов (МВП твэл), высокую ураноемкость и работоспособность в энергонапряженных условиях по совокупности факторов сделаны рекомендации в пользу применения алюминиевых сплавов в качестве матричного материала и диоксида урана в качестве топлива. Учитывая жесткие условия работы твэла: высокие значения тепловой нагрузки, скорости теплоносителя, наличие поверхностного кипения, а также то, что основной вклад во вредное поглощение нейтронов вносит медь матрицы топливной композиции, а не оболочка толщиной 0,15 мм из нержавеющей стали, менять материал оболочки нецелесообразно.

Применение нового твэла с матрицей из менее теплопроводного материала, чем медь, обуславливает использование мер по выравниванию распределения энерговыделения по ТВС и активной зоне для снижения максимальной тепловой нагрузки топлива с помощью выгорающего поглотителя. Оценки показали, что применение выгорающего поглотителя позволит понизить максимальное энерговыделение примерно в два раза, что значительно упростит проблемы, связанные с необходимостью снижения температуры в твэлах. При этом может быть увеличена продолжительность кампании реактора, улучшены теплофизические характеристики активной зоны, ее теплотехнический запас.

Применение МВП твэла и связанная с этим возможность увеличения запаса реактивности позволяет, как показали расчеты, уменьшить объем активной зоны. Уменьшение объема активной зоны при неизменной мощности реактора дает возможность увеличить среднюю объемную тепловую нагрузку топлива и, соответственно, повысить плотность потоков нейтронов всех энергий. По совокупности характеристик предложена картограмма, представленная на рисунке 3. Данная компоновка получается из компоновки рисунка 2б заменой восьми тепловыделяющих сборок (ячейки 42-45 и ячейки 92-95) на бериллиевые блоки.

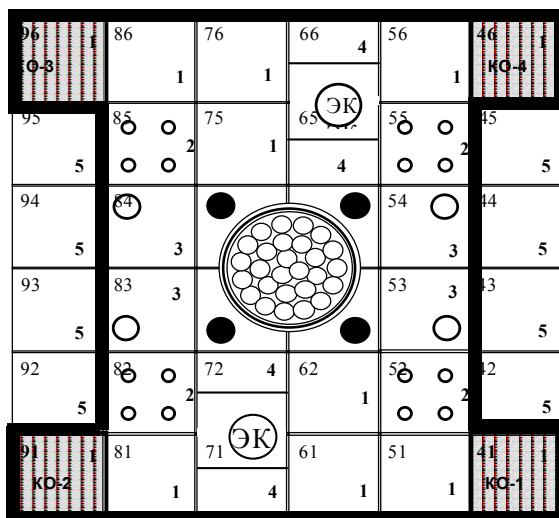


Рисунок 3 – Компоновка активной зоны с форсированными характеристиками (24 РТВС)
 1–ТВС со 188 твэлами; 2–ТВС со 160 твэлами; 3–ТВС со 158 твэлами;
 4–ТВС с 88 твэлами; 5–Ве-блок; ЭК– петлевые каналы

Проведенные оценки показали, что данная компоновка с форсированными характеристиками активной зоны позволяет увеличить плотность потока быстрых нейтронов в ЭК активной зоны примерно в 1,3 раза, тепловых нейтронов в ЦЗБ и отражателе в 1,15÷2,0 раза. Такая компоновка активной зоны в случае ее реализации позволит увеличить скорость набора повреждающей дозы в АК активной зоны, производительность наработки и удельную активность изотопной продукции.

В соответствии с изложенным модернизация активной зоны должна осуществляться в два этапа.

Цель первого этапа состоит в том, чтобы создать условия для увеличения наработки ИП и проведения испытаний конструкционных материалов и макетов устройств при скорости повреждения нейтронами до 20 сна в год и скорости накопления гелия около 500 аррм в год. Необходимо в дополнение к имеющимся создать облучательные позиции для размещения петлевых и ампульных каналов большого диаметра вместо части топлива без ухудшения технико-экономических показателей реактора, увеличив при этом облучательный объем в активной зоне более, чем в 4 раза. Компенсация потерь реактивности из-за замещения топлива дополнительными ЭК на первом этапе должна осуществляться за счет увеличения массы урана-235 в твэле с 5 г до 6 г (т.е. увеличения плотности композиции по урану с 2,2 г/см³ до 2,64 г/см³) и замены чехлов ТВС из нержавеющей стали на чехлы из циркониевого сплава Э110. Проект активной зоны должен предусматривать возможность работы реактора с неполным комплектом петлевых каналов или без них. В этом случае использование модифицированного топлива должно значительно улучшить технико-экономические показатели работы реактора: уменьшить годовое потребление ТВС и урана на (20-30)%.

Основные задачи, которые необходимо решить при реализации первого этапа модернизации активной зоны:

1. Исследование и анализ закономерностей изменения распределения тепловыделения в активной зоне СМ в процессе эксплуатации реактора;
2. Определение режимов работы модифицированных твэлов (с увеличенной загрузкой урана) в компоновке активной зоны после модернизации (рисунок 2б);
3. Проведение петлевых и реакторных испытаний, обоснование работоспособности модифицированных твэлов и ТВС в условиях модернизированной а.з.;
4. Обоснование безопасности и перевод реактора СМ на модифицированное топливо.

Цель второго этапа модернизации: увеличить плотность потока нейтронов, провести дальнейшее улучшение топливного цикла реактора. Цель достигается применением твэла с матрицей на основе алюминиевого сплава (МВП твэла). В рамках второго этапа модернизации активной зоны целесообразно рассмотреть помимо основных вариантов компоновок активной зоны (рисунок 2) компоновку с форсированными характеристиками (рисунок 3).

Основные задачи второго этапа модернизации:

1. Проведение расчетных нейтронно-физических исследований в обоснование топливной загрузки МВП твэла для различных компоновок активной зоны;
2. Обоснование предельных режимов работы МВП твэла;
3. Проведение исследований, оптимизация размещения и выбор параметров выгорающего поглотителя;
4. Расчетные исследования характеристик активной зоны и экспериментальных каналов при использовании МВП твэла и СВП;
5. Обоснование режимов, безопасности проведения, проведение петлевых испытаний МВП твэлов

Во **второй** главе дано описание расчетно-методического обеспечения, используемого для решения задач модернизации активной зоны, изложены результаты исследования и комплексного анализа формирования поля тепловыделения в активной зоне реактора СМ, результаты расчетного обоснования характеристик активной зоны, модернизированной в рамках первого этапа [9-27].

Для высоконапряженной активной зоны реактора СМ с глубоким недогревом теплоносителя одним из основных факторов, ограничивающих мощность твэла, является кризис теплоотдачи. Все это обуславливает актуальность и важность задачи детального (потвэльного, без применения методов гомогенизации в нейтронно-физическом расчете) учета гетерогенной структуры активной зоны при определении тепловыделения и его распределения по твэлам для обоснования компоновочных решений, структуры активной зоны при проведении ее модернизации. Ситуацию усложняет наличие профилирования расхода теплоносителя по ячейкам активной зоны. Трудности принципиального характера при экспериментальном определении максимального энерговыделения связаны с невозможностью моделирования на

физмодели реактора всего многообразия распределения топлива в активной зоне реактора при использовании режима частичных перегрузок топлива.

В этих условиях задача была решена созданием трехмерной расчетной модели реактора, позволяющей детально учитывать при определении тепловыделения гетерогенную структуру активной зоны, и соответствующим тестированием результатов расчета на экспериментальных данных [9, 10]. Для таких потвэльных расчетов нейтронных потоков и тепловыделения был выбран код MCU-RR2. В процессе расчета определяются физических характеристики активной зоны, значения плотности потока тепла с поверхности твэлов, проводится поиск твэлов с максимальными значениями этой величины, находятся значения коэффициентов запаса до кризиса теплообмена с учетом распределения расхода теплоносителя по сборкам. Упрощенная блок-схема алгоритма расчета реактора СМ показана на рисунке 4.

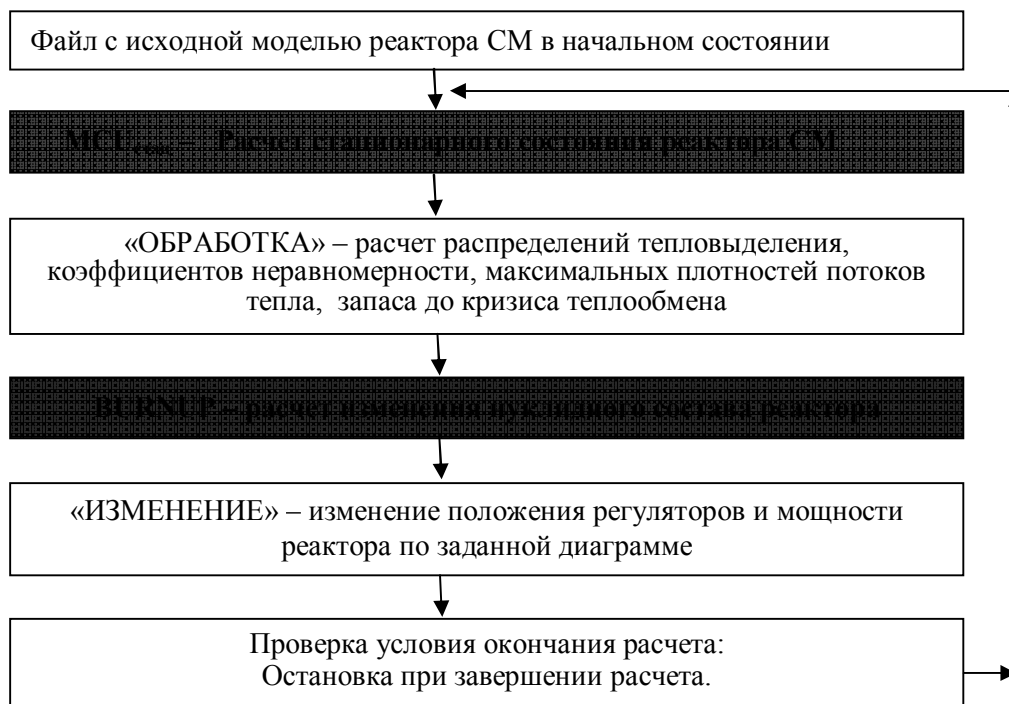


Рисунок 4 – Блок-схема работы расчетной модели реактора СМ (серым цветом выделены стандартные блоки программы MCU-RR2)

В качестве экспериментальных данных для тестирования программы были использованы результаты измерений выгорания топлива по сечению двух топливныхборок, облучавшихся в активной зоне СМ и отличающихся как режимом облучения, так и загрузкой урана в твэлах (ТВС №1 с загрузкой 5 г урана-235 в твэле и ТВС №2 – 6 г урана-235) [29]. При расчетном моделировании истории облучения ТВС на каждом шаге по времени разыгрывалось до 50 миллионов историй нейтронов. При этом статистическая погрешность определения тепловыделения в твэле составила менее 2%. Для экспериментального определения абсолютных значений выгорания топлива был разработан и аттестован эталонный образец выгорания, представляющий собой фрагмент твэла, вырезанный из зоны максимума распределения продуктов деления (ПД). Его характеристики: нуклидный состав тяжелых атомов и продуктов деления были получены с помощью масс-спектрометрического анализа. Погрешность экспериментального определения среднего выгорания в твэле – 6%. Результаты статистического анализа расчетных и экспериментальных данных показали удовлетворительное согласие их между собой (таблица 3).

Таблица 3 – Результаты сравнения расчетных ($V_{расч}$) и экспериментальных ($V_{эксп}$) данных по выгоранию топлива

Параметр	Значение для ТВС		Размерность
	№1	№ 2	
Параметры распределения $\Gamma = V_{эксп} - V_{расч}$			
- объем выборки	27	60	шт
- среднее значение $m(\Gamma)$	-0,13	-0,29	%
- оценка дисперсии $s^2(\Gamma)$	3,8	2,4	%
- СКО	1,9	1,6	%
- критерий χ^2 на проверку нормальности распределения	6,9 (7,8) ⁽¹⁾	3,3 (7,8) ⁽¹⁾	отн.ед.
- t – критерий на значимость отличия $m(\Gamma)$ от нуля	$ -0,36 (2,06)^{(1)}$	$ -1,45 (2,00)^{(1)}$	отн.ед.
Параметры уравнения регрессии			
- β ($V_{эксп} = \beta V_{расч}$)	0,995	0,991	отн.ед.
- СКО (β)	$9,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	отн.ед.
- остаточная дисперсия	0,099	0,064	%
- множественный коэффициент корреляции R	0,98	0,97	отн.ед.

(1)- критическое значение

При определении аксиального распределения температуры теплоносителя в зависимости от расхода теплоносителя в сборке (гидропрофилирование) и мощности ТВС, необходимого для расчета коэффициента запаса до кризиса теплообмена и температурного поля в твэле, использовалась программа ТГРК [12, 13].

Для проведения поисковых исследований, оптимизации и сравнительного анализа характеристик реакторов с различными компоновками и материальным составом а.з. разработана инженерная методика и программа расчета характеристик реактора. Она основана на физической аппроксимации [14-17] основных нейтронно-физических функционалов с использованием эксплуатационных данных реактора и/или результатов реперных расчетов по прецезионным программам. Коэффициент размножения аппроксимируется функционалом дробно-рационального вида, который дает однополовое диффузионное приближение решения уравнения кинетики нейтронов [16].

$$K_{эфф} = \Gamma F(\varepsilon_1, x, \beta) \left[\Gamma A(\varepsilon_1, x, \beta) + \sigma_{окс5} \Gamma S_5(\varepsilon_1, x, \beta) + \frac{\sum_{эп}(\theta_c, \theta_{Тн}, \chi^2)}{\gamma_{Тб} \theta_{сб} \theta_{Тб}} + \frac{\sum_{отр}}{\gamma_{Тб} \theta_{сб} \theta_{Тб}} \right]^{-1}, \text{ где:}$$

• $F(\varepsilon_1, x, \beta) = \nu \sigma_{f5} x \varepsilon_1 \xi_1 \varepsilon_U (1 - \beta)$ – функционал, определяющий размножение нейтронов;

• $A(\varepsilon_1, x, \beta) = \sigma_{a5} x \varepsilon_1 \xi_1 \varepsilon_U (1 - \beta) + \sigma_{a6} \frac{\sigma_{c5}}{\sigma_{a5}} x \varepsilon_1 \xi_1 \varepsilon_U \beta + \sigma_{a8} (1 - x) \varepsilon_1 \xi_1 \varepsilon_U (1 - \beta) \frac{\sigma_{a8}}{\sigma_{a5}}$ – функционал,

определяющий поглощение нейтронов на тяжелых изотопах;

• $S_5(\varepsilon_1, x, \beta) = \frac{\sigma_{f5}}{\sigma_{a5}} \varepsilon_1 \xi_1 \varepsilon_U x \beta$ – функционал, ответственный за поглощение нейтронов на продуктах деления;

• $\sum_{эп} = \sum_1(\theta_c - \theta_{сб}) + \sum_2(\theta_{Тн} - \theta_{Тнб}) + \sum_3(\theta_{зам} - \theta_{замб}) + \sum_4(\theta_T \theta_c - \theta_{Тб} \theta_{сб}) + \sum_{эпб}$ – функционал, определяющий

поглощение на конструкционных материалах, в теплоносителе-замедлителе и утечку нейтронов;

$$\sum_{эпб} = \gamma_{Тб} \theta_{сб} \theta_{Тб} P_6 A_6;$$

$$A_6 = \sigma_{a5} x_6 \varepsilon_1 \xi_1 \varepsilon_U + \sigma_{a8} (1 - x_6) \varepsilon_1 \xi_1 \varepsilon_U;$$

• $\sum_{отр} = \Delta \rho_{отр} F_6 \gamma_{Тб} \theta_{Тб} \theta_{сб}$ – функционал, определяющий стационарное отравление реактора Хе-135 и Sm-149;

$$F_6 = \nu \sigma_{f6} x_6 \varepsilon_1 \xi_1 \varepsilon_U;$$

- ε_1 – массовая доля топливного соединения в сердечнике;
- ε_U – массовая доля урана в соединении урана;
- x – обогащение урана по U-235;
- β – выгорание топлива;
- $$\Gamma = \frac{\gamma_T \theta_c \theta_T}{\gamma_{T6} \theta_{c6} \theta_{T6}};$$

$\gamma_T, \theta_c, \theta_T$ – плотность топлива, объемные доли сердечника в реакторной ячейке и топлива в сердечнике, соответственно;

$$\xi_1 = 2.54 \cdot 10^{-3}, z^{-1};$$

- Индекс «б» означает принадлежность параметра к базовому варианту реперного расчета.

Аппроксимационные параметры $\nu\sigma_{f5}, \sigma_{a5}, \frac{\sigma_{a6}\sigma_{c5}}{\sigma_{a5}}, \sigma_{a8}, \frac{\sigma_{f5}}{\sigma_{a5}}, \Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \Sigma_4, \eta_b, P_b$, входящие в

функционалы, определяются по результатам реперных расчетов по программе [9, 10] и с привлечением эксплуатационных параметров реактора.

Основная трудность, возникающая при решении задачи о моделировании распределения энерговыделения, определении местонахождения и параметров «горячей» точки при проведении сравнительного анализа характеристик различных компоновок активной зоны, связана с использованием режима частичных перегрузок топлива, который обуславливает большое разнообразие возможных распределений топлива по активной зоне в начале кампании.

Применение разработанной методики потвального расчета тепловой нагрузки топлива открывает путь для корректного определения изменения характеристик распределения тепловыделения и плотности теплового потока в процессе эксплуатации реактора и при модернизации активной зоны. Для исследования закономерностей изменения распределения тепловыделения в активной зоне СМ при перегрузках топлива были выбраны 14 кампаний реактора СМ, характеризующихся по проведенным оценкам, наибольшей неравномерностью распределения выгорания топлива после перегрузок [18,19]. Были получены распределения мощности ТВС и плотности теплового потока по активной зоне, коэффициенты неравномерности распределения тепловыделения. На рисунке 5, в качестве примера, приведены максимальные в течение каждой кампании значения плотности теплового потока для различных типовых ячеек (см. рис. 2). Параметры кривых рисунка 5 следующие:

Тип ячейки	1	2	3	4	5
Максимальное значение, МВт/м ²	8,38	7,11	4,87	12,0	7,87
Среднее значение, МВт/м ²	7,37	6,26	4,51	10,57	7,16
СКО, МВт/м ²	0,50	0,49	0,20	0,77	0,48

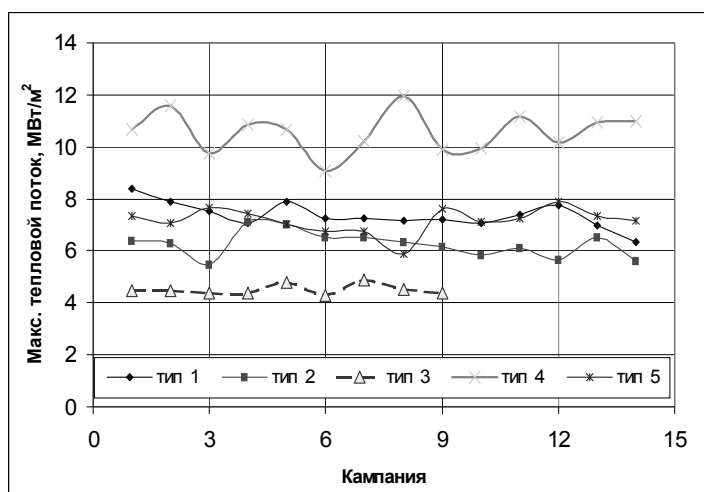


Рисунок 5 – Максимальная достижимая плотность теплового потока для различных типовых ячеек

Исследования распределения энерговыделения в активной зоне при изменении положения регулирующих органов было проведено для компоновок активной зоны, реализованных на реакторе и характеризующихся наибольшим достигнутым значением плотности теплового потока по результатам предыдущего исследования [20,21]. Были получены зависимости распределения мощности ТВС, плотности теплового потока по активной зоне, коэффициентов неравномерности распределения энерговыделения по сечению сборок от положения органов регулирования при их регламентном извлечении.

На рисунке 6 показаны линии одинаковых значений максимальной плотности теплового потока для двух компоновок активной зоны. При регламентном извлечении регуляторов наибольшие значения плотности теплового потока достигаются, как и для мощности ТВС, в точках В (ЦКО 110 мм, КО 450 мм) и D (ЦКО 0 мм, КО 280 мм). На участке CD плотность теплового потока увеличивается на $\sim 1,5$ МВт/м² и в точке D достигает максимального значения за кампанию (13,5 МВт/м²).

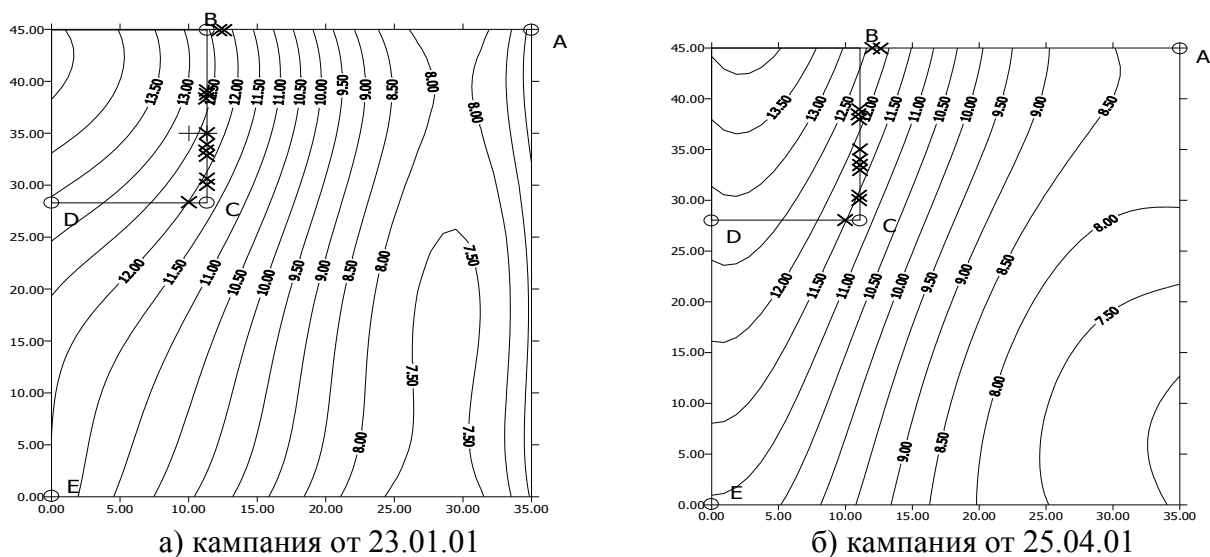


Рисунок 6 – Линии одинаковых значений максимальной плотности теплового потока на поверхности твэла (МВт/м²) при различных положениях регуляторов КО (ось Y, см) и ЦКО (ось X, см). Линия ABCDE соответствует регламентному порядку извлечения регуляторов. Точки, отмеченные значком «х» – положения регуляторов в моменты достижения номинальной мощности.

Детальные исследования распределения тепловыделения в модернизированной активной зоне показали, что при переходе от штатной к базовой компоновке активной зоны (рисунок 2) [22-24]:

- коэффициент неравномерности распределения тепловыделения по сечению активной зоны увеличивается не более чем на 5%; его максимальное значение отмечается при положении, характерном для начала работы реактора на номинальном уровне мощности, и составляет 1,74 для штатной и 1,82 для модернизированной активной зон реактора СМ;
- значение максимального по ячейкам реактора значения коэффициента неравномерности распределения тепловыделения по сечению ТВС при переходе к модернизированной активной зоне практически не изменяется: 2,12 – при положениях ЦКО 0 мм и КО 280 мм, и $2,33 \pm 0,05$ при остальных положениях РО;
- наличие петлевого канала увеличивает коэффициент неравномерности распределения тепловыделения по сечению ТВС (K_k) в соседних ячейках (56, 76 и 61, 81) на $\sim 20\%$; в остальных ячейках этот параметр меняется незначительно;
- для напряженной ТВС в ячейке 54 замена сборки с полным набором твэлов (188 шт) на ТВС с облучательным каналом $\varnothing 24,5$ мм из-за меньшего числа твэлов в ней (158 вместо 188) мощность напряженного твэла и плотность теплового потока возрастают на $\sim 10\%$;

- азимутальный коэффициент неравномерности энерговыделения в твэлах вокруг облучательных каналов \varnothing 12,5 мм при увеличении плотности топлива в твэлах не изменяется и составляет $\sim 1,15$;
- азимутальный коэффициент неравномерности энерговыделения в твэлах вокруг канала \varnothing 24,5 мм составляет 1,24;
- значение максимальной плотности теплового потока в активной зоне) при переходе к модернизированной активной зоне (при одинаковой мощности реактора – 100 МВт) увеличивается на (10-12)%, достигает максимального значения $15,0 \text{ МВт/м}^2$ (при положении ЦКО и КО 0 мм и 280 мм, соответственно) и снижается к концу кампании до $13,4 \text{ МВт/м}^2$. Увеличение плотности теплового потока обусловлено уменьшением общего числа твэлов при переходе к модернизированной активной зоне, то есть увеличением среднего удельного энерговыделения. При сохранении среднего удельного энерговыделения в массиве твэлов на уровне 2 МВт/л (мощность реактора с модернизированной активной зоной при этом должна быть 91,7 МВт) максимальное значение плотности теплового потока остается на том же уровне, что и в штатном варианте.

Значения плотности потока быстрых и тепловых нейтронов, усредненные по характерным группам экспериментальных каналов, представлены в таблицах 4 и 5. Из данных, приведенных в таблицах видно, что плотность потока быстрых нейтронов во вновь созданных АК увеличенного диаметра (\varnothing 24,5 мм) не уступает соответствующему значению в имеющихся АК \varnothing 12,5 мм. Плотность потока быстрых нейтронов в петлевых каналах более чем в два раза превышает соответствующее значение для самых высокопоточных каналов отражателя.

Таблица 4 – Плотность потока быстрых нейтронов ($E > 0,1 \text{ МэВ}$), усредненная по группам каналов реактора СМ, $10^{14} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

Группа каналов	Плотность потока нейтронов для компоновки активной зоны	
	Штатная по рисунку 2а Мощность реактора 100 МВт	Модернизированная по рисунку 2б Мощность реактора 91.7 МВт
2, 4	2,8	2,8
3, 5	2,8	2,3
6, 10	0,3	0,3
7, 11	0,3	0,3
8, 9, 12, 13, Д1, Д3	0,6	0,6
14, 15, 19, 20	0,03	0,03
16, 17, 18, 21	0,03	0,03
Д2, Д7	1,0	0,8
Д5, Д9	1,1	1,1
Д4, Д8	2,6	2,6
Д6, Д10	2,6	2,6
ЦЗБ	8,1	8,2
АК в ТВС \varnothing 12,5 мм	16,3	16,2
АК в ТВС \varnothing 24,5 мм		15,9
ПК (в воде)	3,7 ¹⁾	9,0 ²⁾
ПК (в стали)	4,6 ¹⁾	10,5 ²⁾

¹⁾ ПК расположен в ячейке №5 отражателя.

²⁾ ПК расположен в активной зоне.

В таблице 6 приведены сравнительные данные по эксплуатационным характеристикам реактора с штатной компоновкой активной зоны (рисунок 2а) и с базовой компоновкой модернизированной активной зоной (рисунок 2б) на основе модифицированного топлива.

Таблица 5 – Плотность потока тепловых нейтронов ($E < 0,5$ эВ), усредненная по группам каналов реактора СМ, $10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Группа каналов	Плотность потока нейтронов для компоновки активной зоны	
	Штатная по рисунку 2а Мощность реактора 100 МВт	Модернизированная по рисунку 2б Мощность реактора 91,7 МВт
2, 4	10,5	10,3
3, 5	10,4	9,7
6, 10	4,2	4,2
7, 11	4,2	4,2
8, 9, 12, 13, Д1, Д3	5,4	5,4
14, 15, 19, 20	0,9	0,8
16, 17, 18, 21	1,0	0,8
Д2, Д7	8,1	6,9
Д5, Д9	8,8	8,6
Д4, Д8	9,6	9,4
Д6, Д10	9,6	9,5
ЦЗБ	24,7	24,6
АК в ТВС Ø12,5 мм	1,2	1,1
АК в ТВС Ø24,5 мм	-	1,4
ПК (в воде)	12,1 ¹⁾	13,0 ²⁾
ПК (в стали)	3,6 ¹⁾	2,2 ²⁾

¹⁾ ПК расположен в ячейке №5 отражателя.

²⁾ ПК расположен в активной зоне.

Таблица 6 – Эксплуатационные характеристики реактора с штатной активной зоной и модернизированной по первому этапу

Параметр	Штатная а.з.	Модифицированное топливо	
	32 РТВС	32 РТВС	30 РТВС
Мощность реактора, МВт	100	100	91,7
Объемная плотность теплового потока, МВт/л	2,0	2,0	2,0
Число петлевых каналов	-	-	2
Кампания, сут	9,6	9,6	9,6
Масса ^{235}U (необлученное топливо) в твэле, г	5,0	6,0	6,0
Выгорание ^{235}U в начале цикла, отн.ед.	0,147	0,178	0,150
Масса ^{235}U в активной зоне, кг	25,0	28,3	27,3
Запас реактивности горячего реактора, $\beta_{эф}$:			
- в неотравленном состоянии	8,9	8,5	8,3
- в отравленном состоянии	3,8	3,4	3,2
Темп потери реактивности, $\times 10^{-3} \beta_{эф}$ (МВт·сут)	4,0	3,6	3,6
Среднее выгорание ^{235}U в конце кампании, отн.ед.	0,190	0,214	0,186
Концентрация продуктов деления в выгружаемом топливе, г/см ³	0,51	0,72	0,61
Кампания топлива, сут	76	103	90
Экспериментальный объем в а.з., отн.ед.	1,0	1,7	4,1
Число необходимых ТВС в год	106 (1)	78 (0,73)	83 (0,78)
Расход урана, кг/год	108 (1)	92 (0,85)	99 (0,91)
Производительность наработки ИП реактора ¹⁾ , отн.ед.	1,00	1,00	0,98+ ²⁾

¹⁾ Сумма произведений экспериментальных объемов для накопления ИП реактора на годовой флюенс тепловых нейтронов в них.

²⁾ Знак + означает наличие в а.з. двух ПК для облучения материалов.

Для последнего случая в соответствии с концепцией рассмотрены два варианта компоновки: с петлевыми каналами (30 РТВС) и без них (32 РТВС). Из данных таблицы следует, что при работе реактора с двумя установленными ПК экспериментальный объем в а.з.

увеличивается в 4,1 раза по сравнению со штатной а.з. при улучшении топливоиспользования: годовая экономия в потреблении ТВС составляет 22%, в уране 9% и практически без изменения в производительности наработки ИП.

Без установки петлевых каналов экспериментальный объем в а.з. увеличивается в 1,7 раза. При этом экономия в годовом потреблении ТВС увеличивается до 27%, в высокообогащенном уране – до 15% без изменения в производительности наработки ИП.

В третьей главе приведено расчетно-экспериментальное обоснование работоспособности модифицированного топлива в условиях модернизированной активной зоны [28-37]. Объем проведенных реакторных испытаний в обоснование работоспособности модифицированного топлива и планируемые режимы облучения приведены в таблице 7.

Для определения режимов ранее проведенных испытаний тепловыделяющей сборки с модифицированными твэлами в активной зоне реактора СМ при средних нагрузках (ТВС №1, пункт 1, таблица 7) было проведено расчетное посттестовое моделирование ее условий облучения. Для сравнения поведения опытных твэлов со штатными аналогичные данные были получены для штатной ТВС (ТВС №2, 5 г урана-235 на твэл). С помощью разработанной модели [9, 10] рассчитаны потвэльные распределения тепловыделения и выгорания топлива по сечению тепловыделяющих сборок в процессе облучения, коэффициенты неравномерности распределения тепловыделения по сечению ТВС и реактора, максимальные значения плотности тепловых потоков с поверхности твэлов. Были определены температурное поле по высоте и сечению в каждом твэле в процессе облучения, концентрация продуктов деления. Максимальные значения плотности теплового потока во время испытаний составили 8,5 МВт/м² и 6,6 МВт/м², температуры сердечника – 360°С и 380°С для штатного и модифицированного топлива, соответственно. Достигнутое среднее выгорание – 45%.

Таблица 7 – Характеристики испытаний модифицированных твэлов и ТВС с увеличенной массой урана

№ испытания	Реактор, облучательная позиция	Цель	Выгорание ²³⁵ U, %	Плотность теплового потока, МВт/м ²
1	СМ, активная зона	Определение условий ресурсных испытаний ТВС №1 и ТВС №2 (штатная) при средних параметрах	35–40	9–10
2	СМ, канал низкотемпературной петли ВП-1	Петлевые испытания твэлов в ПТВС №1 при средних параметрах	35–40	9–10
3	СМ, активная зона	Ресурсные испытания двух полномасштабных ЭТВС №1 и №2 с каналами Ø11,9 мм и Ø24,5 мм при средних параметрах	35–40	7–10
4	СМ, канал низкотемпературной петли ВП-1	Петлевые испытания твэлов в ПТВС №2 на максимальные нагрузки	40–45	15
5	СМ, активная зона	Ресурсные испытания опытной полномасштабной ЭТВС №3 на максимальные нагрузки	40–45	13–15

Проведенные исследования по комплексу характеристик твэлов этих сборок показали, что для твэлов с массой 6 г урана-235 как в исходном так и в облученном состояниях нет каких-либо особенностей, которые ограничивали бы их работоспособность по сравнению со штатными твэлами в условиях нормальной эксплуатации реактора.

Планом работы по обоснованию работоспособности топлива с повышенной плотностью урана в твэле предусматривалось изготовить и провести испытания в канале низкотемпературной петлевой установки реактора СМ двух экспериментальных ПТВС с плотностью потока тепла на поверхности твэлов до 15 МВт/м² (п.п. 2, 4, таблица 7),

положительный исход которых мог бы послужить основанием для постановки на облучение в активную зону реактора опытных полномасштабных модифицированных ТВС с чехлом из циркониевого сплава.

На рисунке 7 представлены экспериментальные данные по режимам облучения ПТВС №2. Из данных рисунка видно, что в начале облучения в результате маневра мощностью реактора мощность ПТВС №2 достигла значения ~ 500 кВт, при этом было достигнуто максимальное значение плотности теплового потока $15,7$ МВт/м². Достигнутое максимальное значение выгорания топлива в этих испытаниях составило 50% (накопление ПД до $1,1$ г-оск/см³).

Для экспериментального обоснования работоспособности модифицированных ТВС в условиях модернизированной активной зоны были проведены ресурсные реакторные испытания трех полномасштабных экспериментальных сборок (п.п. 3, 5; таблица 7).

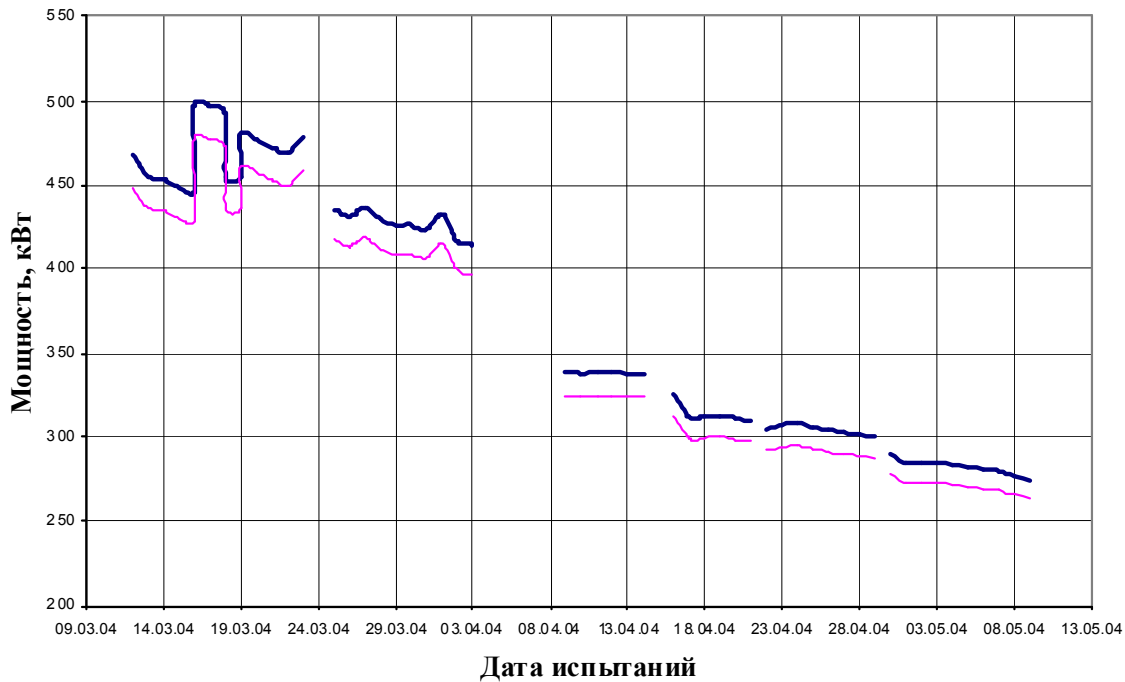


Рисунок 7 – Изменение мощности экспериментальной ПТВС №2 в течение периода испытаний: верхняя кривая – максимальная оценка, нижняя – минимальная

На рисунке 8 приведены зависимости максимальной плотности теплового потока с поверхности твэлов этих экспериментальных сборок в зависимости от времени облучения. Максимальное достигнутое значение плотности теплового потока с поверхности твэлов в этих испытаниях составило 14 МВт/м², среднее выгорание топлива по ТВС до 45% (накопление ПД $0,83$ г-оск/см³), максимальное выгорание – 93% (накопление ПД $1,72$ г-оск/см³).

В результате проведенного комплекса исследований показано, что модифицированное топливо способно работать в эксплуатационных условиях вплоть до предельных выгораний и обеспечить надежную работу реактора с активной зоной, допускающей размещение дополнительных экспериментальных объемов по сравнению со штатной. Проведенные ресурсные испытания показали высокую работоспособность твэлов с повышенным содержанием урана и ТВС на их основе в условиях модернизированной активной зоны. Достигнутые параметры испытаний экспериментальных ТВС соответствуют, а по некоторым показателям превышают штатные.

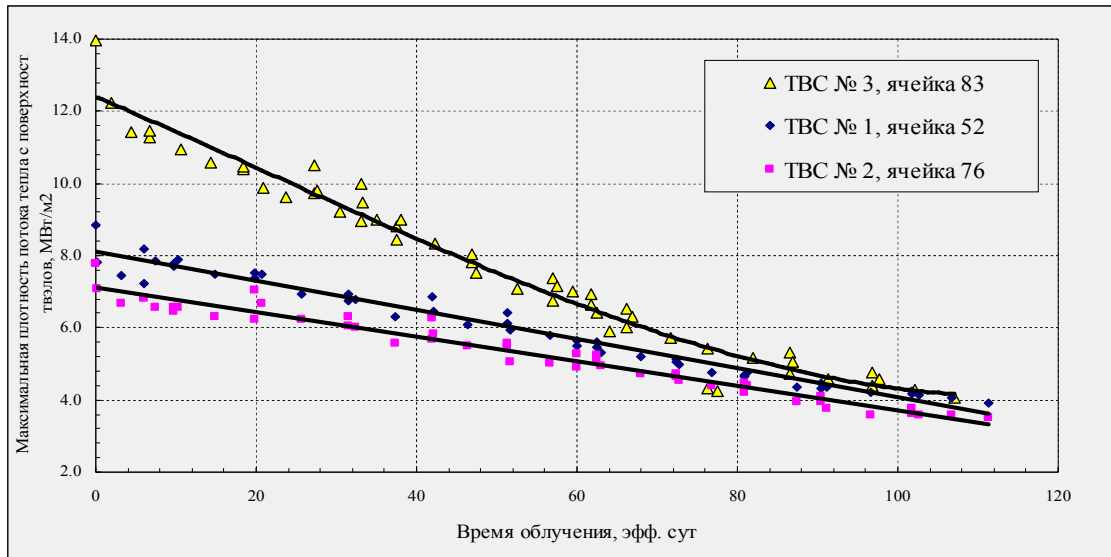


Рисунок 8 – Зависимости максимальной плотности теплового потока с поверхности ТВЭЛ ЭТВС от времени облучения

В **четвертой** главе изложены подходы и результаты реализации первого этапа модернизации активной зоны [38-44]. Традиционный подход к реализации компоновки активной зоны при переводе реактора на модифицированное топливо с использованием процедуры критопыта не подходил из-за непомерно больших временных затрат, срыву поставок изотопной продукции по контрактам и программы облучения материалов. Поэтому была предложена процедура постепенной замены штатных сборок на модифицированные в процессе работы реактора при использовании штатного режима частичных перегрузок топлива.

Первоочередная задача заключалась в обосновании принципиальной возможности реализации такого перевода реактора СМ на топливо с повышенной плотностью по урану без применения специальных дополнительных технических мер при условии обеспечения требований безопасности и, в дальнейшем, в экспериментальном подтверждении нейтронно-физических и технико-экономических характеристик реактора с модернизированной активной зоной.

Условия, которые должны выполняться при расчетном моделировании алгоритма перегрузок переходного режима работы реактора СМ, формулировались следующим образом:

- подкритичность реактора в начале кампании с взведенными стержнями АЗ, исходя из требований нормативно-технической документации (НТД) и с учетом сложившейся практики должна быть не менее $1,1\% \Delta k/k$;
- запас реактивности в начале кампании должен обеспечивать энерговыработку не меньшую, чем $850 \text{ МВт}\cdot\text{сут}$;
- относительная величина мощности ТВС в типовых ячейках не должна превышать следующих значений (показано в главе 2):
 - для ячеек типа 4 – $2,02$;
 - для ячеек типа 5 – $1,45$;
 - для ячеек типа 1 – $1,54$;
 - для ячеек типа 2 – $1,26$;
 - для ячеек типа 3 – $1,13$

Результаты проведенных исследований показали, что реализация переходного режима возможна в процессе штатных перегрузок реактора без дополнительных специальных технических мер. При этом выполняются требования по значениям подкритичности и длительности кампаний. Максимальные тепловые нагрузки также лежат в допустимых пределах.

В таблице 8 приведены максимальные и средние по основным типовым ячейкам реактора значения относительной мощности ТВС при моделировании переходного режима.

Здесь же приведены допустимые значения относительной мощности сборок, определенные исходя из существующего гидропрофилирования.

Обоснование принципиальной возможности перевода реактора на новое топливо, используя режим штатных перегрузок топлива, позволило перейти к решению задач, связанных непосредственно с переходом на модифицированные сборки в реакторе.

Таблица 8 – Максимальные и средние по типовым ячейкам реактора СМ значения энерговыделения по всем рассмотренным кампаниям

№ кам- пании	Ячейки типа 54		Ячейки типа 55		Ячейки типа 44		Ячейки типа 45		Ячейки типа 46	
	Макс.	Средн.	Макс.	Средн.	Макс.	Средн.	Макс.	Средн.	Макс.	Средн.
Исход- ная	1,703	1,406	1,036	0,957	1,23	1,055	1,082	0,885	1,02	0,9
1	1,669	1,422	1,079	0,944	1,392	1,006	1,161	0,921	1,02	0,91
2	1,588	1,442	1,275	1,089	1,487	0,871	1,083	0,970	1,00	0,9
3	1,454	1,359	1,171	1,028	1,500	0,924	1,177	1,032	0,96	0,88
4	1,646	1,402	1,170	1,096	1,317	0,922	1,164	0,969	0,87	0,83
5	1,700	1,460	1,147	1,059	1,400	0,860	1,198	0,996	0,92	0,81
6	1,682	1,501	1,031	1,009	1,447	0,886	1,165	0,961	0,83	0,78
7	1,700	1,515	1,039	0,991	1,321	0,849	1,051	0,941	1,04	0,98
	Допустимые значения относительного энерговыделения									
	2,02		1,45		1,54		1,26		1,13	

В процессе перевода реактора решали следующие задачи:

- выбор приемлемых компоновок активной зоны для каждой очередной кампании на основании результатов расчетов с соответствующим анализом эксплуатационных запасов и обоснованием характеристик безопасности реактора;
- отработка возможных алгоритмов перегрузок активной зоны;
- экспериментальное исследование изменения физических характеристик активной зоны при поэтапной замене топлива;
- по завершении перевода реактора на новое топливо – получение опытных данных для внесения необходимых изменений в проектную документацию и проведения уточняющего анализа безопасности реакторной установки.

Для обеспечения надежности и достоверности определения физических характеристик реактора, важных для обеспечения его безопасности в процессе перевода активной зоны на модифицированное топливо, применяли комплексный подход, сочетающий расчетные и экспериментальные методы. Замену штатных ТВС на модифицированные проводили поэтапно в процессе плановых перегрузок топлива без нарушения проектных пределов эксплуатации реактора, его графика работы, связанного с выполнением научных и коммерческих программ и в соответствии с требованиями ядерной безопасности.

На рисунке 9 приведены опытные данные по изменению среднего выгорания топлива в активной зоне в процессе перевода реактора на опытные модифицированные ТВС с повышенным содержанием урана.

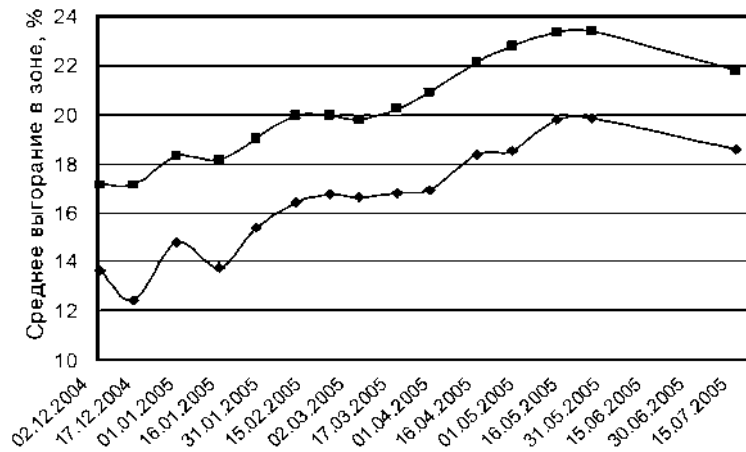


Рисунок 9 – Среднее выгорание топлива в активной зоне на начало (♦) и конец (■) кампании

В таблице 9 приведены физические характеристики реактора в результате перевода на модифицированное топливо. По представленным данным можно отметить, что замена

Таблица 9 – Физические характеристики реактора СМ

Параметр	Активная зона из штатных ТВС	Активная зона из опытных ТВС	
		Расчетное значение	Экспериментальное значение
Средний запас реактивности, $\beta_{эф}$	11,2	10,8	10,7 \pm 1,1
Средняя суммарная эффективность органов ЦКО и КО, $\beta_{эф}$	13,2	12,2	13,2 \pm 1,3
Стационарное отравление ксеноном, $\beta_{эф}$	-5,5	-5,1	-5,3 \pm 0,2
Эффект от разогрева активной зоны при переходе от нулевой к номинальной мощности, $\beta_{эф}$	-0,56	-0,65	-0,62 \pm 0,06
Температурный коэффициент реактивности при рабочих параметрах активной зоны, $\beta_{эф}/^{\circ}\text{C}$	-0,018	-0,019	-0,020 \pm 0,002
Средний эффект от выгорания и шлакования топлива, $\beta_{эф}$	-5,5	-5,1	-4,8 \pm 0,5
Темп потери реактивности на выгорание топлива, $\beta_{эф}/(\text{МВт}\cdot\text{сут})$	0,0061	0,0032	0,0054 \pm 0,0005
Мощностной коэффициент реактивности для "горячего отравленного" состояния реактора, $\beta_{эф}/\text{МВт}$	$-(4,0\pm 1,3)\times 10^{-3}$	$-(4,0\pm 1,0)\times 10^{-3}$	$-(4,7\pm 0,5)\times 10^{-3}$
Эффект реактивности от загрузки свежей ТВС в ячейку с водой:			
ячейка типа 42	0,9	1,5	1,1 ²⁾
ячейка типа 43	1,2	1,6	1,5 ^{2)/1,2^{3)/1,1⁴⁾}}
ячейка типа 52	1,2	1,5	1,5 ^{2)/1,2^{3)/1,1⁴⁾}}
ячейка типа 53	1,9	2,1	2,3 ^{2)/1,7⁴⁾}
Эффект реактивности от выгрузки ТВС с выгоранием 35%			
ячейка типа 42	-0,5	-0,7	-0,5 ²⁾
ячейка типа 43	-0,5	-0,7	-0,6 ^{2)/-0,5^{3)/-0,4⁴⁾}}
ячейка типа 52	-0,4	-0,5	-0,6 ^{2)/-0,5^{3)/-0,4⁴⁾}}
ячейка типа 53	-0,9	-1,0	-1,1 ^{2)/-0,8⁴⁾}

²⁾ ТВС со 188 твэлами; ³⁾ ТВС со 160 твэлами; ⁴⁾ ТВС со 158 твэлами.

штатных ТВС на модифицированные не привела к значимому изменению нейтронно-физических характеристик реактора СМ, несмотря на существенное увеличение количества топлива в активной зоне. Это вызвано увеличением выгорания топлива и повышенным содержанием ПД, а также увеличенной блокировкой топлива при увеличении его плотности. С учетом погрешностей расчетов и экспериментов расчетные прогнозные оценки характеристик модернизированной активной зоны достаточно хорошо согласуются с полученными опытно-экспериментальными данными.

При соблюдении действующего графика работы реактора подтверждена прогнозируемая значительная годовая экономия в использовании необлученного топлива (таблица 10): в 2005 году было израсходовано на 24 ТВС меньше чем в 2004 году и на 29 ТВС меньше чем в 2003 году. Также существенно (в 1,3 раза) снизилось количество ТВС, использованных для получения энерговыработки 1000 МВт•сут, экономия в уране в 2005 году составила 15%. В настоящее время в установившемся цикле годовая экономия в ТВС составляет 42%, в уране – 30% (см. две последние колонки).

Таблица 10 – Фактические показатели использования топлива в реакторе СМ

Параметр	2003г.	2004г.	2005г.	2013г.	2014г.
Энерговыработка, МВт•сут	21125	21923	21639	22424	20940
Годовое потребление ТВС, шт.	106(1)	101(0,95)	77(0,73)	60(0,58)	59(0,57)
Расход ТВС на 1000 МВт•сут	5,02(1)	4,61(0,92)	3,56(0,71)	2,68(0,56)	2,82(0,59)
Годовое потребление урана-235, кг	98,0(1)	92,6(0,94)	82,9(0,85)	66,3(0,70)	65,2(0,68)

Сравнение с данными 2004 года показало, что на начало кампании количество топлива (масса ^{235}U) в активной зоне увеличилось в среднем на 10,7% (с 25,3 кг до 28 кг), среднее выгорание топлива – в 1,3 раза (с 14,7 до 19,4%), масса осколков деления ^{235}U – в 1,5 раза (с 4.5-5.0 до 7.0-8.0 кг), среднее выгорание топлива в выгружаемых ТВС – в 1,16 раза (с 31-32 до 38.5-39.0%).

Пятая глава посвящена исследованию характеристик активных зон с использованием МВП твэла [45-55]. Предложен подход и сформулирован критерий для выбора основных характеристик активных зон исследовательских реакторов (ИР) в широком диапазоне изменения параметров топливного цикла, определяющий качество активной зоны ИР, как отношение произведения отнормированных на соответствующие показатели для действующего реактора годового флюенса быстрых нейтронов и экспериментального объема к сумме годового расхода урана и годовой потребности в ТВС с наложенными ограничениями на концентрацию ПД в выгружаемом топливе.

Таким образом, целевой функцией (критерий качества активной зоны ИР) задачи на максимум является:

$$K(g_5^{me}, T) = \frac{2\tilde{\Phi}(g_5^{me}, T) \times \tilde{V}_{эк}}{\tilde{G}_U(g_5^{me}, T) + \tilde{N}_{TBC}(g_5^{me}, T)},$$

где: $\tilde{G}_U = G_U / G_U^{umm}$; $\tilde{N}_{TBC} = N_{TBC} / N_{TBC}^{umm}$; $\tilde{V}_{эк} = V_{эк} / V_{эк}^{шт}$ – расход урана, число необходимых ТВС для работы модернизированной активной зоны в течение 1 года и экспериментальный объем, отнесенные к соответствующим значениям для штатной активной зоны;

$\tilde{\Phi} = \Phi / \Phi_{шт} = \varphi_{\sigma} / \varphi_{\sigma}^{шт} \cdot T / T_{шт} \cdot n_k / n_k^{шт}$ – определенный таким же образом флюенс быстрых нейтронов в активной зоне;

$\Phi_{шт}, \varphi_{\sigma}^{шт}$ – флюенс и плотность потока быстрых нейтронов в штатной активной зоне;

$\varphi_{\sigma}(g_5^{me})$ – плотность потока быстрых нейтронов в модернизированной активной зоне, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;

G_5^{me} – масса ^{235}U в твэле;

T – кампания реактора, сут;

n_k – число кампаний в году.

В качестве основного ограничения, определяющего область возможных значений параметров, принята концентрация продуктов деления в сердечнике. При использовании трех типов ограничений на среднее накопление ПД ($0,5$ г-оск/ см^3 , $0,6$ г-оск/ см^3 и $(0,6-0,7)$ г-оск/ см^3) обоснована загрузка урана-235 в МВП твэле 4г для активной зоны базовой компоновки (рисунок 2б) и 5г для а.з. с форсированными характеристиками (рисунок 3).

Получены нейтронно-физические характеристики активной зоны на основе МВП твэла. Исследованы зависимости температурного поля в сердечнике твэла, распределения температуры и плотности теплового потока по периметру твэла. С учетом технологических возможностей изготовления и условий достижения необходимых физических характеристик реактора предложена оптимальная геометрия МВП твэла, обоснованы рабочие тепловые нагрузки для экспериментальных твэлов в трех конструктивных исполнениях. Обоснован способ размещения выгорающего поглотителя в ТВС, его содержание в СВП, обеспечивающие необходимые мощностные и температурные режимы МВП твэла в течение кампании топлива в условиях модернизированной активной зоны.

Исследование геометрии профиля крестообразного твэла с целью уменьшения максимальной температуры сердечника при сохранении или увеличении тепловой нагрузки топлива позволило рекомендовать в качестве оптимальных и технологически осуществимых значения радиуса лопасти креста 0.5 мм и радиуса впадины 1 мм при сохранении описанного диаметра 5.15 мм. Обоснована целесообразность применения центрального вытеснителя из неделиющегося материала в твэле, который позволяет снизить максимальное значение температуры сердечника на $(70-80)^\circ\text{C}$ и коэффициент неравномерности распределения плотности потока тепла с поверхности твэла на 16%. Исходя из допустимых температурных режимов работы топливных композиций обоснован выбор максимальных значений плотности теплового потока для опытных МВП твэлов трех конструктивных исполнений:

- 7,8 МВт/ м^2 для твэла со сплошным сердечником из $\text{UO}_2 + \text{Al}$, загрузка урана-235 в твэле 5 г;
- 9,1 МВт/ м^2 с сердечником из $\text{UO}_2 + \text{Al}$ с центральным вытеснителем, загрузка урана-235 в твэле 4,5 г;
- 7,5 МВт/ м^2 для твэла со сплошным сердечником из $\text{UO}_2 + \text{Al}, \text{Zr}$, загрузка урана-235 в твэле 5 г.

Предложен способ размещения СВП в межтвэльном пространстве вдоль грани ТВС со смещением решетки твэлов на один ряд. Это решение позволяет снизить неравномерность распределения тепловыделения по сечению ТВС в 1,35 раза.

При проведении исследований нейтронно-физических характеристик активной зоны с МВП твэлами и СВП обоснованы оптимальный выбор разбиения ВП на физические зоны при расчете выгорания и шаг по времени. Обоснована загрузка оксида гадолия естественного состава в СВП 6,24 г, которая обеспечивает выполнение сформулированных требований по тепловым нагрузкам топлива (мощности напряженного твэла) и по времени выгорания поглотителя (рисунки 10, 11).

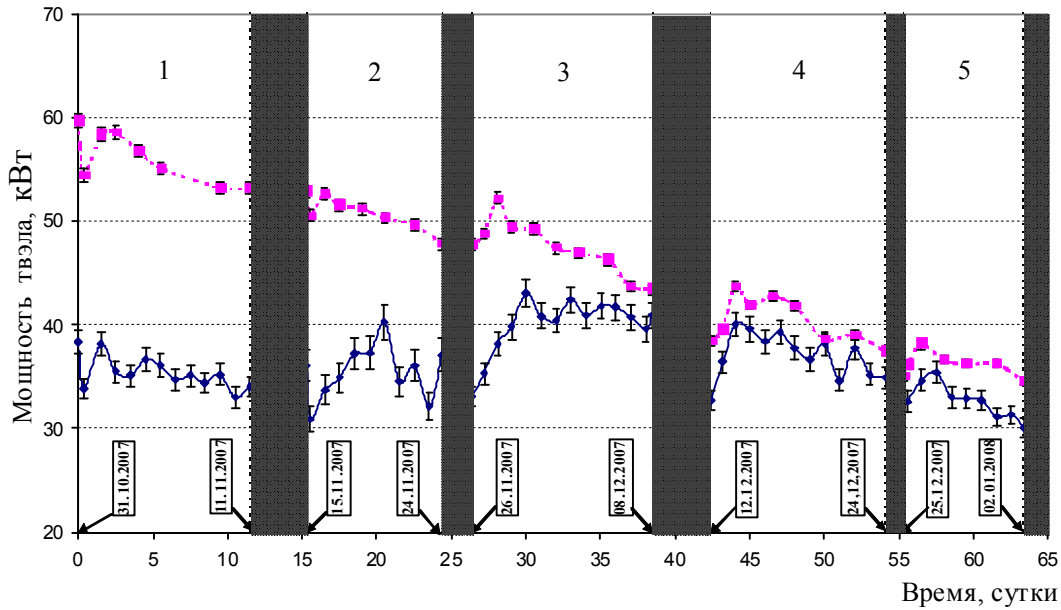


Рисунок 10 – Изменение мощности максимально напряженного ТВЭЛ:

— — ТВС с СВП (загрузка 6,24 г оксида гадолиния); - - - - ТВС без СВП;
1-5 – номера кампаний; ■ — интервалы времени между кампаниями.

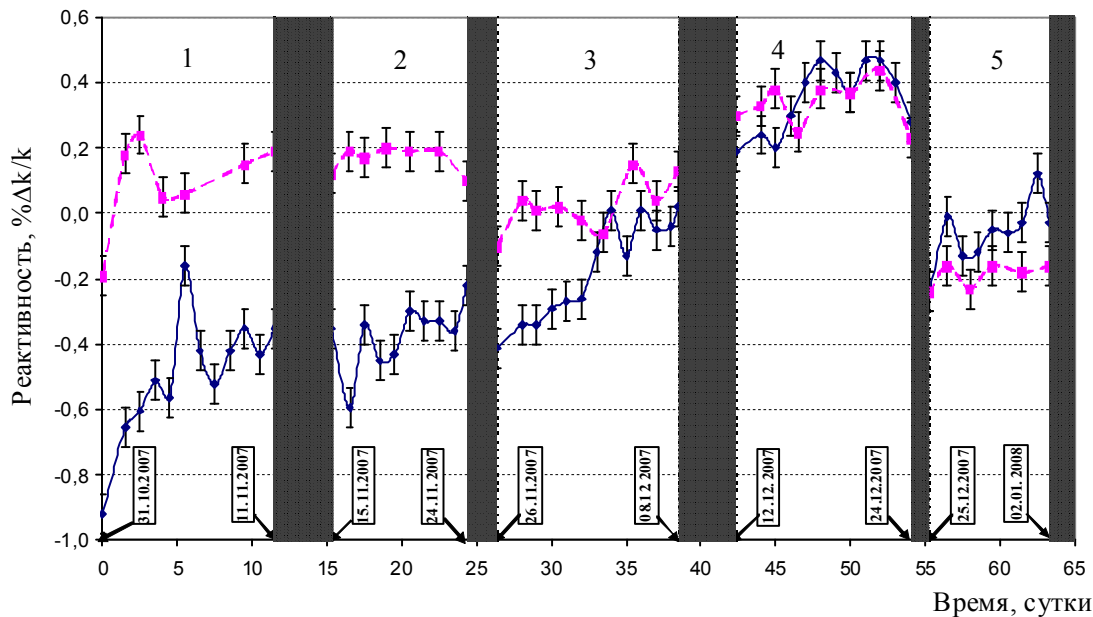


Рисунок 11 – Значения реактивности, полученные в процессе моделирования активной зоны:

— — в 62-ой ячейке ТВС с СВП (загрузка 6,24 г оксида гадолиния); - - - - в 62-ой ячейке ТВС без СВП; 1-5 – номера кампаний; ■ — интервалы времени между кампаниями.

Сравнение плотности потоков нейтронов в активной зоне с МВП ТВЭлами и модифицированным топливом показало:

- увеличение плотности потока нейтронов в каналах отражателя в среднем за кампанию реактора: промежуточных – на 8 %, тепловых нейтронов на – 12 % и уменьшение плотности потоков тепловых нейтронов в ЦЗБ примерно на (2-3)% вследствие наличия в ТВС СВП;
- увеличение плотности потока тепловых нейтронов до 2 раз в ЭК в ТВС активной зоны и на 20% плотности потока промежуточных нейтронов. Плотность потока быстрых нейтронов остается в активной зоне практически без изменения.

Применение МВП ТВЭла в компоновке а.з. без ПК (32 ТВС), как следует из таблицы 11, увеличивает производительность наработки ИП на 10%, качество а.з. (критерий К)

увеличивается при этом на 40%. Топливоиспользование по сравнению с а.з. с модифицированным топливом улучшается: годовая экономия составляет 40% в уране и 11% в ТВС.

Применение МВП твэла в компоновке а.з. с двумя ПК (30 ТВС), увеличивает производительность наработки ИП на 9%, критерий качества а.з. увеличивается на 30%. Экономия в годовом потреблении урана составляет 33% при одинаковом потреблении ТВС.

В таблице 12 представлены характеристики активной зоны с форсированными характеристиками для двух значений продолжительности кампании 9,6 и 15 суток (содержание U-235 – 5 г в твэле). По сравнению с базовой компоновкой активной зоны, модернизированной по первому этапу (рисунок 2б), плотность потока нейтронов всех энергий в а.з. увеличивается в 1,3–1,9 раза, критерий качества а.з. увеличивается на (30-40)% при увеличении годового потребления рабочих ТВС на 10–30% в зависимости от продолжительности кампании реактора и при уменьшении потребности в уране до 16%. Производительность наработки ИП возрастает в (1,5-1,6) раза с возможностью увеличения удельной активности продукции и при одинаковом экспериментальном объеме в активной зоне для испытаний материалов.

Таблица 11 – Сравнительные эксплуатационные характеристики реактора (модифицированное топливо и МВП твэл)

Параметр	Медная матрица		МВП твэл	
	Компоновка а.з. с 32 РТВС	Компоновка а.з. с 30 РТВС	Компоновка а.з. с 32 РТВС	Компоновка а.з. с 30 РТВС
Мощность реактора, МВт	100	91,7	100	100
Объемная плотность теплового потока, МВт/л	2,00	2,00	2,00	2,17
Число петлевых каналов	–	2	–	2
Кампания, сут	9,6	9,6	9,6	9,6
Масса ^{235}U (необлученное топливо):				
- в твэле, г	6,0	6,0	4,0	4,0
- в активной зоне, кг	34,4	32,1	22,9	21,4
Выгорание ^{235}U в начале цикла, отн.ед.	0,178	0,150	0,302	0,244
Масса ^{235}U в активной зоне, кг	28,3	27,3	16,0	16,2
Среднее выгорание ^{235}U в конце кампании, отн.ед.	0,214	0,186	0,356	0,302
Концентрация продуктов деления в выгружаемом топливе, г/см ³	0,72	0,61	0,80	0,67
Среднее число выгружаемых ТВС, шт	3,0	3,2	2,6	3,2
Кампания топлива, сут	103	90	116	90
Число потребляемых ТВС в год	78 [1]	83 (1)	69 [0,89]	84 (1,01)
Расход урана, кг/год	92 [1]	99 (1)	55 [0,60]	66 (0,67)
Плотность потока нейтронов в а.з., отн. ед. ¹⁾				
- быстрых	0,97 [1]	0,94 (1)	0,97 [1,0]	1,00(1,06)
- тепловых	0,88 [1]	0,83 (1)	1,60 [1,8]	1,57(1,9)
Критерий К, отн.ед. ¹⁾	2,1 [1]	4,7 (1)	2,9 [1,4]	6,0 (1,3)
Производительность наработки ИП реактора ²⁾ , отн. ед.	1,00	0,98	1,10	1,07

¹⁾Относительно штатной компоновки а.з. (рисунок 2а).

²⁾Сумма произведений экспериментальных объемов для накопления ИП реактора на годовой флюенс тепловых нейтронов в них.

Уменьшение объема активной зоны на основе МВП твэла (переход с 30 РТВС на 24 РТВС) позволяет увеличить флюенс быстрых нейтронов в а.з. в (1,3-1,4) раза, производительность наработки ИП реактора в (1,35-1,45) раза. При этом топливные затраты увеличиваются: в годовом потреблении сборок на (10–30)%, в уране в 1,3÷1,5 раза. В результате

значение критерия качества для всех трех вариантов активных зон с МВП твэлом не отличается более, чем на 10%. Т.е. качество данной компоновки активной зоны по сравнению с компоновкой из (30-32) ТВС с точки зрения условий испытаний материалов из-за значительного увеличения топливных затрат не улучшается.

Таблица 12 – Сравнительные эксплуатационные параметры активных зон с двумя ПК

Параметр	Медная матрица	МПВ твэл		
	Компоновка по рисунку 2б	Компоновка по рисунку 2б	Компоновка по рисунку 3; 24 ТВС	
	30 РТВС	30 РТВС	Топливный цикл 1	Топливный цикл 2
Мощность реактора, МВт	91,7	100,0	100,0	100,0
Объемная плотность теплового потока, МВт/л	2,00	2,17	3,00	3,00
Число петлевых каналов	2	2	2	2
Кампания, сут	9,6	9,6	9,6	15,0
Масса ^{235}U (необлученное топливо) в твэле, г	6,0	4,0	5,0	5,0
Выгорание ^{235}U в начале цикла, отн.ед.	0,150	0,244	0,186	0,150
Среднее выгорание ^{235}U в конце кампании, отн.ед.	0,186	0,302	0,250	0,250
Концентрация продуктов деления в выгружаемом топливе, г/см ³	0,61	0,67	0,66	0,61
Кампания топлива, сут	90	90	65	60
Число перегрузок в году	26,1	26,1	26,1	18,3
Число необходимых ТВС в год	83 (1,0)	84 (1,01)	92 (1,11)	111 (1,33)
Расход урана, кг/год	99 (1,0)	66 (0,67)	83 (0,84)	99 (1,00)
Плотность потока нейтронов, отн.ед.:				
- быстрых	1,0	1,06	1,38	1,35
- тепловых	1,0	1,89	1,92	1,83
Флюенс быстрых нейтронов в активной зоне, отн.ед.	1,0	1,06	1,38	1,49
КИУМ	0,69	0,69	0,69	0,75
Критерий К, отн.ед.	1,0	1,3	1,4	1,3
Производительность наработки ИП реактора ¹⁾ , отн. ед.	1,00	1,10	1,46	1,57

¹⁾ Сумма произведений экспериментальных объемов для накопления ИП реактора на годовой флюенс тепловых нейтронов в них.

В **шестой** главе проведено обоснование режимов петлевых испытаний опытных МВП твэлов трех конструктивных исполнений в соответствии с требованиями, сформулированными в главе 5. Приведены результаты расчетного сопровождения испытаний МВП твэлов [56-58].

Испытания проводились в высокопоточном канале низкотемпературной петли ВП-1 реактора СМ. На рисунке 12 приведено горизонтальное сечение канала с ОУ из восьми опытных твэлов. Кожух прямоугольного сечения является разделителем потока. Устройство оснащено четырьмя ТЭП, измеряющими температуру теплоносителя на входе и выходе из рабочего участка. ЭК загружались в канал №2 отражателя реактора. Мощностной режим для твэлов каждого исполнения подбирался толщиной чехла ТВС, материалом корпуса канала. Рассматривались варианты, когда для снижения энерговыделения в твэлах в канале размещался поглощающий тепловые нейтроны экран в виде стальной трубы, установленной на чехол ЭТВС.

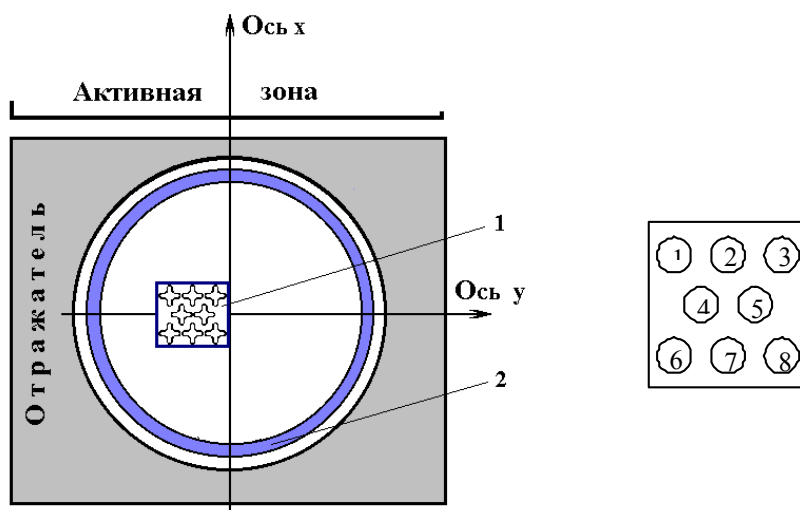


Рисунок 12 – Схема горизонтального сечения канала с ОУ в отражателе реактора (а): ПТВС (1), корпус канала (2); схема нумерации твэлов (б)

Результаты расчета плотности теплового потока с опытных твэлов с использованием экрана приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Максимальная плотность теплового потока с поверхности твэлов с МВП при использовании экрана в виде стальной трубы

Номер исполнения твэла	Размеры экрана, мм	Плотность теплового потока, МВт/м ²			
		Стальной канал		Циркониевый канал	
		ячейка №4	ячейка №2	ячейка №4	ячейка №2
1 и 3	Ø32×2,5	8,9	9,8	11,3	12,3
2	Ø32×2,5	8,7	9,5	10,7	11,6
1 и 3	Ø32×3,5	8,5	9,3	–	–
1 и 3	Ø32×4,5	8,3	9,2	–	–

На рисунке 13 представлены предтестовые расчетные зависимости максимальной температуры топливной композиции и наружной поверхности оболочки от плотности теплового потока для трех вариантов конструктивного исполнения опытных твэлов. Средняя скорость теплоносителя в ЭТВС равна 12,4 м/с, температура теплоносителя на входе в ЭТВС 50°С, что соответствует параметрам работы теплонапряженной штатной ТВС реактора СМ. Время проведения облучений и основные достигнутые параметры испытаний ЭТВС приведены в таблице 14.

Изменение мощности ЭТВС во время испытаний показано на рисунке 14. Общая тенденция уменьшения мощности ЭТВС обусловлена выгоранием топлива в твэлах МВП, в то время как локальные изменения мощности – перераспределением топлива в активной зоне во время перегрузок ТВС, изменением мощности реактора, перемещением РО СУЗ.

За период облучения максимальные значения температуры топливного сердечника и наружной поверхности оболочки твэлов в ЭТВС изменялись в диапазонах, соответственно:

- с твэлами МВП первого исполнения – от 384 до 269 и от 244 до 175 °С;
- с твэлами МВП второго исполнения – от 337 до 257 и от 217 до 170 °С;
- с твэлами МВП третьего исполнения – от 395 до 246 и от 230 до 146 °С.

По расчетным данным в конце испытаний среднее (таблица 14) и максимальное выгорание топлива (убыль ²³⁵U) в ЭТВС составляет, соответственно:

- с твэлами МВП первого исполнения – 50,6 и 62,4%;
- с твэлами МВП второго исполнения – 40,7 и 50,7%;
- с твэлами МВП третьего исполнения – 57,4 и 70,7%.

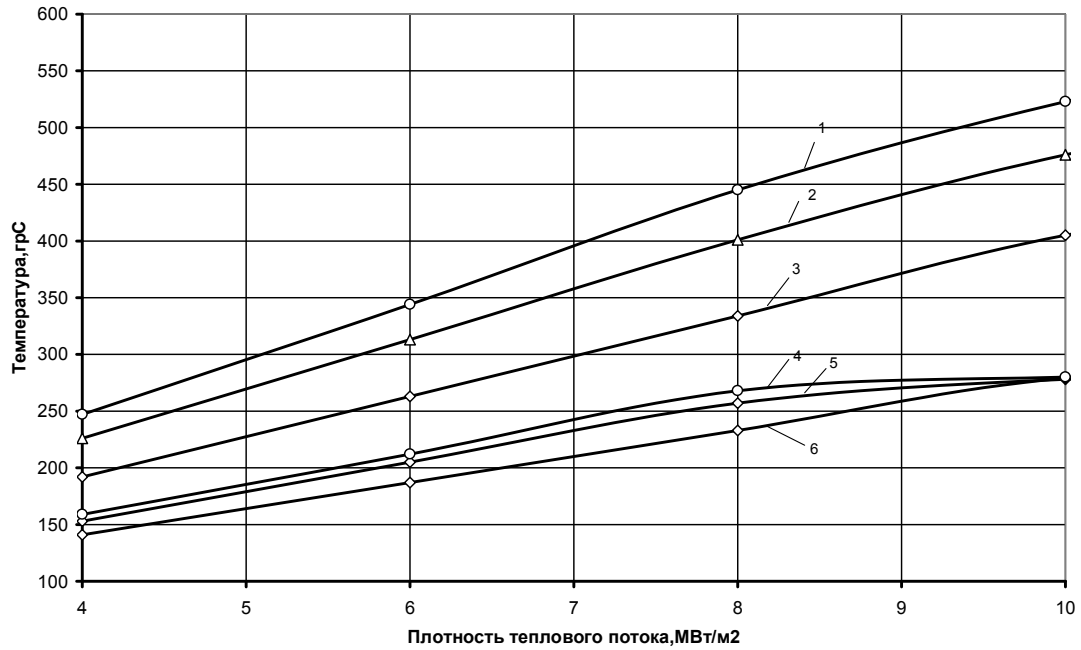


Рисунок 13 – Зависимости максимальной температуры топливного сердечника и наружной температуры поверхности оболочки ТВЭЛ от максимальной плотности теплового потока: 1, 2, 3 – температура топливного сердечника третьего, первого и второго исполнения ТВЭЛов; 4, 5, 6 температура наружной поверхности оболочки третьего, первого и второго исполнения ТВЭЛов, соответственно

Таблица 14 – Параметры испытаний ЭТВС

Параметр	Значение для ТВЭЛ МВП исполнения		
	1	2	3
Время облучения:			
- дата начала	07.05.2009г.	17.02.2011г.	20.07.2011г.
- дата окончания	18.09.2010г.	15.04.2011г.	12.11.2011г.
Средний расход теплоносителя через канал, м ³ /ч	7,7	7,8	7,7
Средняя скорость теплоносителя, м/с	14,4	14,6	14,4
Давление теплоносителя на входе в канал, МПа	4,9	4,9	4,9
Максимальная температура теплоносителя на входе в ЭТВС, °С	75	56	50
Мощность ЭТВС, кВт			
-средняя	191	225	188
-максимальная	217	257	236
Максимальная плотность теплового потока, МВт/м ²	6,8	8,0	7,3
Максимальная температура, °С			
-наружной поверхности оболочки	238	215	229
-топливного сердечника	360	333	391
Энерговыработка, МВт-сут	14,2	10,3	16,2
Время работы на мощности, эфф.сут*	75	46	86
Среднее выгорание топлива в ЭТВС,%	50,6	40,7	57,4
Средняя концентрация ПД в топливной композиции, г-оск/см ³	1,01	1,53	1,15

* Эффективное время определяется как отношение энерговыработки реактора к мощности 90 МВт

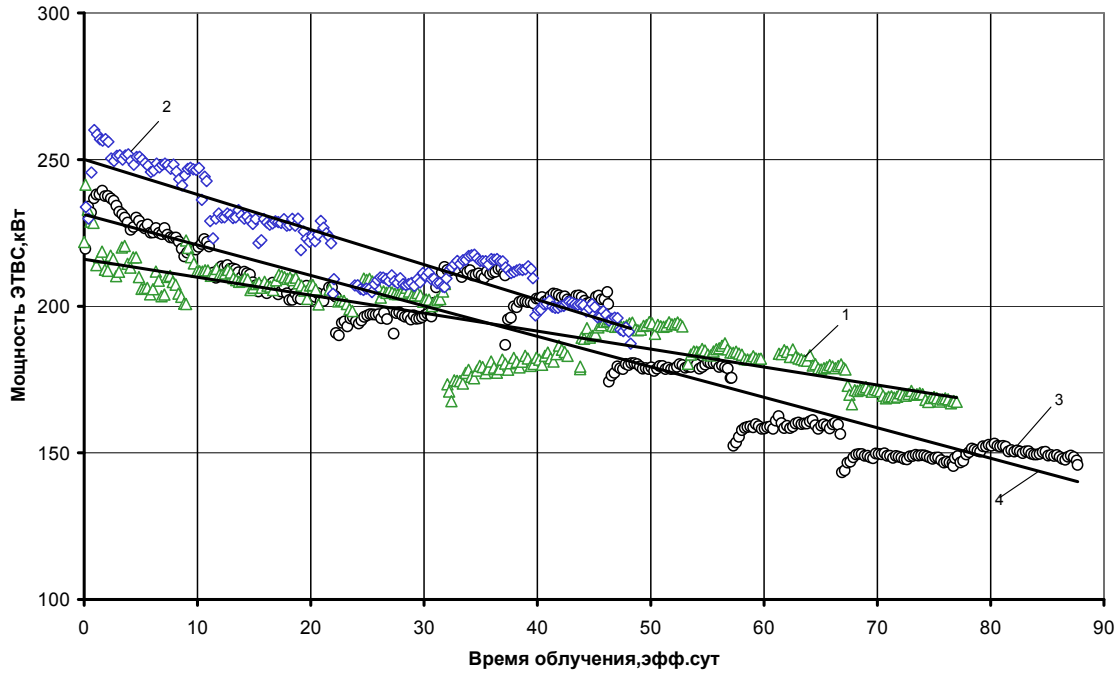


Рисунок 14 – Изменение мощности ЭТВС от времени облучения.
1, 2, 3 - мощность ЭТВС с ТВЭлами МВП первого, второго и третьего исполнения, соответственно, 4- линия тренда

Приведенные данные говорят о том, что достигнутое во время испытаний среднее выгорание топлива в экспериментальных сборках в (1,1–1,5) раза превышает среднее выгорание топлива в штатных ТВС, концентрация продуктов деления в сердечнике больше на (15–35)%.

В результате проведенных ресурсных испытаний ТВЭЛы с малым вредным поглощением всех конструктивных исполнений сохранили герметичность в режимах, близких к эксплуатационным в условиях модернизированной активной зоны реактора СМ.

Заключение

1. Проведено обоснование концепции двухэтапной модернизации активной зоны реактора СМ с целью увеличения экспериментальных объемов в активной зоне, повышения плотности потока нейтронов и улучшения топливного цикла реактора. Обоснован выбор способа компенсации потерь запаса реактивности на первом этапе модернизации, определены нейтронно-физические характеристики модернизированной активной зоны базовой компоновки с модифицированным топливом. Сформулированы задачи второго этапа модернизации, обоснованы пути их решения.

2. Разработано расчетно-методическое обеспечение для решения задач модернизации активной зоны. Создана инженерная программа расчета эксплуатационных характеристик реактора, основанная на физической аппроксимации коэффициента размножения нейтронов функционалом дробно-рационального вида, для проведения поисковых расчетов при выборе компоновочных решений модернизированной активной зоны. Сформулирована задача и разработана методика детального (потвэльного, без применения гомогенизации) расчета нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик активной зоны, позволяющая исследовать изменения локальных условий работы ТВЭЛов, с использованием которой создана прецезионная трехмерная расчетная модель реактора. Проведено тестирование модели на статистически значимом объеме экспериментальных данных по выгоранию в штатном и модифицированном топливе, которое показало хорошее согласие результатов.

3. Выполнен системный детальный анализ изменения распределения тепловыделения в активной зоне реактора СМ в зависимости от положения органов регулирования и распределения выгорания топлива в активной зоне в результате частичных перегрузок топлива. С использованием результатов анализа проведены расчетные исследования нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик модернизированной активной зоны с модифицированным топливом в базовой компоновке с различным числом установленных петлевых каналов. Обосновано значение мощности реактора, нейтронно-физические характеристики экспериментальных каналов. Показано, что в соответствии с концепцией модернизации плотность потока нейтронов с $E > 0,1 \text{ МэВ}$ во вновь образованных АК Ø24,5 мм, предложенной в работе конструкции, составляет $1,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$; в петлевых каналах – $(0,9-1,0) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, что в два раза выше, чем в самых высокопоточных каналах отражателя при штатной компоновке активной зоны. При увеличении экспериментальных объемов в активной зоне в 4,1 раза (включая ПК) годовая экономия в тепловыделяющих сборках составляет 22%, в уране 9% при незначительном уменьшении (примерно на 2%) производительности накопления ИП. При компоновке активной зоны без ПК экспериментальный объем в а.з. увеличивается в 1,7 раза, экономия в ТВС составляет 27%, в уране – 15% без уменьшения производительности накопления ИП. Результаты исследований явились основой технических проектов модифицированных твэла, ТВС, модернизированной активной зоны по первому этапу.
4. Проведено моделирование, сравнительный анализ режимов облучения и результатов послереакторных исследований ТВС с модифицированными твэлами, обоснованы режимы, проведено сопровождение комплекса реакторных испытаний модифицированного топлива при различных тепловых нагрузках, по результатам которых обоснована его работоспособность в условиях модернизированной активной зоны реактора.
5. Предложена методология, обоснован сценарий поэтапного перевода реактора на модифицированное топливо с использованием штатной процедуры частичной перегрузки топлива. Проведено расчетное сопровождение перевода реактора на новое топливо. Получены опытные данные по характеристикам модернизированной активной зоны, которые показали удовлетворительное согласие с расчетными и подтвердили прогнозы по значительному улучшению топливоиспользования реактора.
6. Проведено расчетное обоснование содержания топлива в твэле с малым вредным поглощением нейтронов (МВП твэле) для различных компоновок модернизированной активной зоны; предложен способ размещения и обоснованы параметры стержней с выгорающим поглотителем в ТВС. Показано, что для базовой компоновки активной зоны с использованием МВП твэла плотность потока тепловых нейтронов в ЭК отражателя увеличивается на 12 % в среднем за кампанию реактора; в ЭК активной зоны плотность потока увеличивается: в 2 раза для тепловых нейтронов и в 1,2 раза для промежуточных; в ЦЗБ плотность потока нейтронов уменьшается на (2-3)% в среднем за кампанию реактора. Производительность наработки изотопной продукции в целом по реактору увеличивается примерно на 10%. Характеристики топливоиспользования реактора улучшаются: годовая экономия в уране составляет 33% при одинаковом потреблении рабочих сборок для активной зоны с петлевыми каналами и 40% в уране и 11% в ТВС для активной зоны без ПК. В целом, применение МВП твэлов экономически целесообразно по сравнению с модифицированным топливом при любой компоновке а.з.. При этом, число петлевых каналов в активной зоне должно выбираться исходя из конъюнктуры на рынке услуг по облучению материалов.

Компоновка активной зоны с форсированными характеристиками позволяет увеличить производительность наработки ИП реактора в (1,35-1,45) раза по сравнению с компоновкой а.з. из (30-32) РТВС с МВП твэлами. Однако при этом качество данной компоновки а.з. с точки зрения условий испытания материалов из-за значительного увеличения топливных затрат не улучшается. Поэтому целесообразность реализации данной компоновки будет определяться конъюнктурой на рынке изотопной продукции.

7. Проведено обоснование тепловой нагрузки, температурных режимов и сопровождение испытаний экспериментальных МВП твэлов трех конструктивных модификаций. В результате проведенных испытаний твэлы всех конструктивных исполнений сохранили герметичность в режимах, близких к эксплуатационным в условиях модернизированной активной зоны. Выбор конструктивного исполнения МВП твэла может быть сделан после проведения послереакторных материаловедческих исследований.

В результате исследований, выполненных в рамках диссертационной работы, решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение: обоснована и реализована на практике возможность проведения в активной зоне реактора СМ в больших объемах высокодозных облучений реакторных материалов для обоснования инновационных проектов, продления ресурса энергоблоков АЭС при значительном улучшении топливоиспользования реактора. Предложены новые научно обоснованные технические решения для дальнейшего улучшения экспериментальных возможностей, топливного цикла реактора и увеличения наработки изотопной продукции.

Таким образом, поставленные задачи решены и достигнута основная цель работы.

Очевидно, что изучение таких сложных объектов, как исследовательские реакторы – это труд коллективный. Автор выражает благодарность за тесное сотрудничество при выполнении исследований, представленных в диссертации, работников ОАО «ГНЦ НИИАР», ОАО «НИКИЭТ», ОАО «ВНИИНМ». В создании расчетно-методического обеспечения, проведении расчетов и разработке конструкторских решений по результатам исследований участвовали сотрудники НИИАР: Чертков Ю.Б., Пименов В.В., Клинов А.В., Марихин Н.Ю., Туртаева Н.Б.; сотрудники НИКИЭТ: Карташев Е.Ф., Лукичев В.А., Кравцова О.А.. В подготовке, проведении реакторных испытаний и получении результатов послереакторных исследований непосредственное и творческое участие принимали сотрудники НИИАР: Малков А.П., Калинина Н.К., Мельдер Р.Р., Новоселов А.Е., Чечеткина З.И., Шишин В.Ю.; сотрудники ВНИИНМ: Ватулин А.В., Волков В.С. Автором идеи концепции модернизации и вдохновителем всей работы является профессор В.А. Цыканов.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Цыканов В.А., Клинов А.В., Старков В.А. Опыт создания, реконструкции и эксплуатации высокопоточного исследовательского реактора СМ // Сб. докл.: «XXXIV зимняя школа ПИЯФ». Гатчина, 8 февраля-4 марта 2000. С.3-16.
2. Цыканов В.А., Старков В.А., Клинов А.В., Святкин М.Н. Высокопоточный реактор СМ и его роль в развитии науки и техники // Брошюра. ОАО «ГНЦ НИИАР». Дмитровград, 2011, 32с.
3. **Клинов А.В., Цыканов В.А., Старков В.А., Пименов В.В. и др. Модернизация активной зоны реактора СМ для решения задач материаловедения // АЭ. 2002. Т. 93. №3. С. 167.**
4. Старков В.А., Цыканов В.А., Святкин М.Н. и др. Модернизация активной зоны реактора СМ // Сб. докл.: «XII ежегодная конференция ЯО РФ «Исследовательские реакторы: наука и высокие технологии». ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», 2001. Т. 2. Ч. 1. С.3.
5. Цыканов В.А., Старков В.А., Святкин М.Н., Петелин А.Л. и др. Модернизация активной зоны реактора СМ // Сб. докл. отраслевого совещ. «Использование и эксплуатация исследовательских реакторов». Дмитровград. 2005. Т. 1. С.153.
6. Клинов А.В., Старков В.А., Цыканов В.А., Чертков Ю.Б. Концепция модернизации активной зоны СМ //Статья в сб. «Отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2004г». ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР». С.15-18.
7. Цыканов В.А., Старков В.А., Клинов А.В., Федосеев В.Е. О выборе конструкции и материального состава твэлов для высокопоточных ИЯР // Сб. тр. (ежеквартальный сборник научных статей) ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР». 2005. Вып. 4. С.3-20.

8. Цыканов В.А., Старков В.А., Пименов В.В. и др. Характеристики модернизированной активной зоны реактора СМ с твэлом штатной геометрии и топливной композиции с повышенным содержанием урана // Сб. тр. (ежеквартальный сборник научных статей) ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР». 2003. Вып.2. С.27-35.
9. **Старков В.А., Чертков Ю.Б. Расчетная модель реактора СМ и результаты ее тестирования при определении выгорания топлива и распределения продуктов деления // Известия вузов. Ядерная энергетика. №2, 2011, с.3-11.**
10. Бестужева И.В., Чертков Ю.Б., Старков В.А. и др. Усовершенствованная расчетная модель реактора СМ и результаты ее тестирования // Статья в сб. «Отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2003г.». ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР». С.17-19.
11. Ванеев Ю.Е., Марихин Н.Ю., Старков В.А. Использование имитатора IMCOR_SM в исследованиях по обоснованию модернизации активной зоны реактора СМ. // Сб. трудов ОАО «ГНЦ НИИАР», 2010, вып.1, с.46-51.
12. **Старков В.А., Марихин Н.Ю. Методика и программа расчета стационарного температурного поля в системе многозонных цилиндрических твэлов . // Известия вузов. Ядерная энергетика. № 1, 2013, с. 54-62.**
13. Старков В.А., Марихин Н.Ю. Методика и программа расчета температурного поля в системе многозонных цилиндрических твэлов (ТГРК). // Сб.тр. (ежеквартальный сборник научных статей) ОАО «ГНЦ НИИАР», 2014, вып. 1, с. 9-19.
14. Ванеев Ю.Е., Гаврилов А.В., Старков В.А., Марихин Н.Ю. Использование имитатора IMCOR_SM в исследованиях по обоснованию модернизации активной зоны реактора //Доклад на 20-ом отраслевом семинаре «Нейтроника – Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики». 27-30 октября 2009. Обнинск.
15. **Старков В.А., Поливанов И.Ф. Эффективные граничные условия на поверхности тонких цилиндрических тел и на границе полых цилиндрических каналов // ВАНТ. Сер. «Математическое моделирование физических процессов».вып. 4, 2011, с. 16-28**
16. Старков В.А. Физическая аппроксимация параметров реактора в анализе характеристик ядерного топливного цикла. Внутренний топливный цикл: учебное пособие / Димитровград: ДИТИ НИЯУ МИФИ, 2014. – 104 с.
17. Старков В.А., Красноселов В.А. Методы анализа ядерного топливного цикла (Внутренний топливный цикл): учебное пособие ISBN 978-5-9795-0113-0 / Димитровград: ДИТУД УлГТУ, 2007. – 125 с.
18. **Клинов А.В., Пименов В.В., Старков В.А., Чертков Ю.Б. Изменение распределения энерговыделения в активной зоне реактора СМ при перегрузках и в процессе кампании // Известия вузов. Ядерная энергетика. №4. 2010. С. 45-54.**
19. Бестужева И.В., Старков В.А., Клинов А.В., Чертков Ю.Б. и др. Анализ изменения распределения энерговыделения в активной зоне реактора СМ в зависимости от ее компоновки // Статья в сб. «Отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2003г.». НИИАР. С. 23-25.
20. **Клинов А.В., Старков В.А., Чертков Ю.Б. Изменение характеристик активной зоны реактора СМ при изменении положения регулирующих органов // Известия вузов. Ядерная энергетика. № 4. 2010. С. 55-63.**
21. Старков В.А., Бестужева И.В., Чертков Ю.Б. и др. Исследование нейтронно-физических параметров активной зоны реактора СМ при изменении положения регулирующих органов //Статья в сб. «Отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2002г.». ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР». С. 23-25.
22. Святкин М.Н., Старков В.А., Петелин А.Л., Исаев Ю.Н. и др. Тепловыделяющая сборка исследовательской реакторной установки // Полезная модель. Патент № 68168 от 30.07.2007г.

23. **Цыканов В.А., Клинов А.В., Старков В.А. Основные итоги первого этапа модернизации активной зоны реактора СМ // А.Э. Т.102. Вып.2. 2007. С. 86-92.**
24. Старков В.А., Бестужева И.В., Чертков Ю.Б. и др. Исследование распределения энерговыделения в модернизированной активной зоне реактора СМ //Статья в сб. «Отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2002г.». ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР». С. 15-17.
25. **Федосеев В.Е., Цыканов В.А., Старков В.А. Совершенствование конструкции крестообразного твэла для повышения его теплотехнических характеристик // АЭ. 2005. Т. 98. Вып. 4. С. 274-280.**
26. Старков В.А., Пименов В.В., Федосеев В.Е. Исследование температурных режимов работы элементов активной зоны реактора СМ // Статья в сб. «Отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2002г.». НИИАР. С. 25-27.
27. Старков В.А., Федосеев В.Е. Распределение температуры и плотности теплового потока по периметру твэла крестообразного сечения // Сб. тр. (ежеквартальный сборник научных статей). ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР». 2003. Вып.2. С. 3-9.
28. Бурукин В.П., Клинов А.В., Старков В.А. и др. Результаты исследований в обоснование работоспособности ураноемкого твэла реактора СМ // Сб. тр. (ежеквартальный сборник научных статей). ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР». 2003. Вып.2. С. 35-46.
29. **Старков В.А., Новоселов А.Е., Чечеткина З.И., Федосеев В.Е. Результаты расчетного моделирования условий реакторных испытаний и результатов послереакторных исследований в обоснование работоспособности модифицированного твэла реактора СМ // Ядерная физика и инжиниринг, 2011, том 2, №5, с. 1-12.**
30. **Старков В.А., Федосеев В.Е., Шишин В.Ю. Моделирование условий и результаты петлевых испытаний модифицированных твэлов СМ в обоснование их работоспособности. // Известия вузов. Ядерная энергетика. № 2, 2013, с. 105-113.**
31. Калинина Н.К., Старков В.А., Клинов А.В., Мельдер Р.Р. Результаты испытаний твэлов реактора СМ с повышенным содержанием ^{235}U при средних и максимальных тепловых нагрузках //Статья в сб. «Отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2004г.». ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР». С. 18-19.
32. Чечеткина З.И., Старков В.А., Новоселов А.Е. и др. Комплекс исследований твэлов реактора СМ в обоснование их эксплуатации при повышенных параметрах //Статья в сб. «Отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2006г.». ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР». С. 36.
33. Клинов А.В., Овчинников В.А., Мельдер Р.Р., Старков В.А. Испытания твэлов ИЯР в реакторах СМ и МИР // Сб. докл.: «VII Российская конференция по радиационному материаловедению». Димитровград. НИИАР. 8-12 сентября 2003. С. 76-86.
34. **Старков В.А., Святкин М.Н., Клинов А.В., Малков А.П. и др. Испытания опытных сборок реактора СМ с повышенной загрузкой урана.//Известия вузов.Ядерная энергетика. № 3, 2011, с. 28-36.**
35. Цыканов В.А., Чертков Ю.Б., Старков В.А., Федосеев В.Е. и др. Реакторные испытания ТВС с повышенной загрузкой урана в активной зоне реактора СМ //Статья в сб. «Отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2004г.». ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР». С. 20-23.
36. Цыканов В.А., Чечеткина З.И., Новоселов А.Е., Старков В.А. и др. Оценка работоспособности твэлов СМ с увеличенным содержанием урана // Сб. докладов международной конференции «Исследовательские реакторы в 21 веке» 21-24 июня 2006, Москва, НИКИЭТ.

37. Цыканов В.А., Четкина З.И., Старков В.А., Чертков Ю.Б. и др. Основные результаты исследований твэлов реактора СМ с повышенным содержанием урана // Сб. трудов ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР». 2005. вып.3. с.3-20. Димитровград.
38. **Цыканов В.А., Старков В.А., Малков А.П., Святкин М.Н. и др. Результаты расчетно-экспериментального обоснования режимов и сопровождения массовых испытаний опытных ТВС реактора СМ с повышенной загрузкой урана.//Известия вузов. Ядерная энергетика. №3, 2011, с. 37-46.**
39. Старков В.А., Клинов А.В., Святкин М.Н., Федосеев В.Е. Основные итоги первого и задачи второго этапа модернизации активной зоны реактора СМ // Сб. тр.: «XLII зимняя школа ПИЯФ». Гатчина. 25 февраля 2008. С.
40. Старков В.А., Святкин М.Н., Малков А.П., Петелин А.Л. и др. Характеристики и экспериментальные возможности реактора СМ после первого этапа модернизации активной зоны //Статья в сб. «Отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2006г.». ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР». С. 17-20.
41. Клинов А.В., Старков В.А., Малков А.П., и др. Реактор СМ после модернизации активной зоны // Сб. докл. международной конф. «Научные проблемы развития атомной энергетики на современном этапе». Минск. Беларусь. 13-15 ноября 2007г.
42. Старков В.А., Цыканов В.А., Клинов А.В., Святкин М.Н. Характеристики модернизированной активной зоны реактора СМ // Бюллетень МАГАТЭ: IGORR NEWSLETTERS – 2006 г.
43. Клинов А.В., Старков В.А., Малков А.П., Цыканов В.А. и др. The SM reactor after core modernization // Сб. докл. международной конф. по ИР: «Безопасное управление и эффективное использование». Сидней. Австралия. 5-7 ноября 2007г.
44. Старков В.А., Клинов А.В., Цыканов В.А., Чертков Ю.Б. и др. Характеристики и экспериментальные возможности реактора СМ после модернизации активной зоны // Сб. докл. международной конф. «Исследовательские реакторы в 21 веке». Москва. НИКИЭТ. 21-24 июня 2006.
45. Старков В.А., Цыканов В.А., Клинов А.В., Бестужева И.В. и др. Обоснование выбора загрузки урана в твэл с малым вредным поглощением для модернизированной активной зоны СМ // Сб. тр. (ежеквартальный сборник научных статей) ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР». 2005. Вып.2. С. 29-44.
46. Старков В.А., Федосеев В.Е., Цыканов В.А. Твэлы для высокопоточного реактора СМ с топливной композицией на основе алюминия как матричного материала // Сб. докл. международной конф. «Исследовательские реакторы в 21 веке». Москва. НИКИЭТ. 21-24 июня 2006 г.
47. Цыканов В.А., Старков В.А., Клинов А.В., Федосеев В.Е. Теплотехнические характеристики твэла для высокопоточного реактора СМ с топливной композицией на основе алюминия как матричного материала //Статья в сб. «Отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2005г.». ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР». С. 18-21.
48. Старков В.А., Клинов А.В., Федосеев В.Е. и др. Твэл с малым вредным поглощением нейтронов для высокопоточного исследовательского реактора СМ //Статья в сб. «Отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2006г.» ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР». С. 26-27.
49. Старков В.А., Святкин М.Н., Пименов В.В. и др. Разработка твэла с малым вредным поглощением нейтронов для высокопоточного исследовательского реактора СМ // Сб. тр. (ежеквартальный сборник научных статей) ОАО «ГНЦ НИИАР». 2008. Вып. 4. С. 31-38.
50. Цыканов В.А., Старков В.А., Ватулин А.В., Морозов А.В. и др. Твэлы для высокопоточных исследовательских реакторов // Сб. докл. «VII Российская конференция по радиационному материаловедению». Димитровград. ГНЦ РФ НИИАР. 8-12 сентября 2003. С. 25-39.

51. **Волков В.С., Клинов А.В., Старков В.А., Морозов А.В. и др. Разработка экспериментального твэла с малым вредным поглощением нейтронов для высокопоточного исследовательского реактора СМ // АЭ. Т. 106. Вып. 6. 2009. С. 314-318.**
52. Старков В.А., Чертков Ю.Б., Святкин М.Н. Тепловыделяющая сборка исследовательского реактора // Патент № 131229 от 10.08.2013г.
53. Клинов А.В., Старков В.А., Чертков Ю.Б., Бестужева И.В., Чекалкин С.И. Оптимизация формы и размеров стержней с выгорающим поглотителем в модернизированной активной зоне реактора СМ //Статья в сб. «Отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2003г.» ГНЦ РФ НИИАР. С. 20-22.
54. Старков В.А., Клинов А.В., Петелин А.Л., Пименов В.В. и др. Расчетно-экспериментальное обоснование нейтронно-физических и тепло-гидравлических характеристик экспериментальных каналов и активной зоны реактора СМ с твэлами МВП и СВП // Статья в сб. «Отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2010г.», ОАО «ГНЦ НИИАР», с. 13-14.
55. Марихин Н.Ю., Пименов В.В., Старков В.А. Исследование характеристик активной зоны реактора СМ с дисперсионным топливом и матрицей на основе алюминиевого сплава. // Сб. трудов (ежеквартальный сборник научных статей) ОАО «ГНЦ НИИАР».2014, вып. 1, с. 3-8.
56. **Клинов А.В., Калинина Н.К., Пименов В.В., Старков В.А. и др. Испытания экспериментальных ТВС с малым вредным поглощением нейтронов в реакторе СМ. //Известия вузов. Ядерная энергетика, №2, 2013. с.114-122.**
57. Старков В.А., Святкин М.Н., Клинов А.В., Марихин Н.Ю. и др. Исследования в обоснование характеристик и работоспособности твэла СМ с матрицей на основе алюминия // «XLIV Зимняя школа ПИЯФ». 9–13 марта 2010г. С.20.
58. Старков В.А., Клинов А.В., Петелин А.Л., Пименов В.В. и др. Испытания твэлов типа СМ с малым вредным поглощением нейтронов для высокопоточных исследовательских ядерных реакторов // Статья в сб. «Отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2010г.». ОАО «ГНЦ НИИАР». С. 12–13.