

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого**

Институт энергетики

На правах рукописи

Нерсесян Нарек Саакович

**Разработка и верификация моделей расчета нейтронно-физических
характеристик малогабаритных реакторов с быстрым спектром
нейтронов**

Направление подготовки: 14.06.01 – Ядерная, тепловая и возобновляемая энергетика и сопутствующие технологии

Направленность: 14.06.01_01 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Нерсесян Нарек Саакович
Научный руководитель: профессор,
д.т.н. Михайлов Владимир Евгеньевич

Санкт Петербург – 2020

Научно-квалификационная работа выполнена в ВШАиТЭ федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Директор ВШАиТЭ: Калютик Александр Антонович,
кандидат технических наук,
доцент.

Научный руководитель: Михайлов Владимир Евгеньевич,
доктор технических наук,
профессор.

Рецензенты: Федорович Евгений Данилович,
доктор технических наук,
профессор, СПбПУ Петра
Великого, профессор – Высшая
школа атомной и тепловой
энергетики.

Парамонова Ирина Львовна,
кандидат технических наук,
СПбПУ Петра Великого, доцент –
Высшая школа атомной и
тепловой энергетики.

Ельшин Александр Всеволодович,
доктор технических наук, старший
научный сотрудник, ФГУП
«НИТИ им. А.П. Александрова»,
начальник отдела нейтронно-
физических исследований.

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

а.з.	– активная зона;
ИК	– ионизационная камера;
КИН	– компенсирующий источник нейтронов;
КС	– критический стенд;
КП	– комплекс программ;
НИТИ	– ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»;
НФХ	– нейтронно-физические характеристики;
ОРУК	– обращенное решение уравнения кинетики;
ОЯД	– оцененные ядерные данные;
ППН	– плотность потока нейтронов;
РБН	– реактор на быстрых нейтронах;
РО	– рабочие органы;
РОСФОНД	– Российские файлы оцененных нейтронных данных;
СУЗ	– система управления и защиты;
ЯЭУ	– ядерная энергетическая установка.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время в России развиваются инновационные проекты реакторов на быстрых нейтронах (РБН). В особую группу, объединяющую наиболее малогабаритные реакторы, входят РБН с газовым теплоносителем. Такие реакторы востребованы в системах энергоснабжения в космической отрасли. Применение ядерных реакторов в качестве источника энергии на различных космических объектах предъявляет к ним ряд специфических технических требований, отличных от требований, предъявляемых обычно к стационарным энергетическим реакторам:

- минимально возможный габарит и масса реактора;
- большие энергонапряженности (энерговыделение в единице объема) активной зоны (а.з.) реактора;
- использование тугоплавких металлов, карбидов и металлокерамики в качестве конструкционных материалов в составе а.з.;
- возможность оперативного изменения мощности реактора.

Эти требования в значительной степени определяют физические особенности ядерных реакторов космического назначения. Ядерные энергетические установки (ЯЭУ) являются сложными наукоемкими техническими комплексами. Весь мировой опыт развития ядерной энергетики наглядно и убедительно подтверждает необходимость стендовых испытаний и отработки ЯЭУ, предваряющих их серийное производство. Существенно возрастает роль стендовой отработки ЯЭУ при необходимости решения принципиально новых и ранее не ставившихся задач, а также в условиях, когда предъявляемые требования существенно отличаются от требований, реализуемых в ЯЭУ с традиционными техническими решениями. Несмотря на издержки, связанные с созданием и эксплуатацией наземного стенда-прототипа ЯЭУ, результаты отработки и комплексных испытаний [1] в конечном счете дают реальную экономию при серийном строительстве установок, а также повышают надежность, живучесть и

безопасность ЯЭУ, что при отсутствии стенда приходилось бы обеспечивать за счет дорогостоящих и не всегда эффективных экспериментов.

Учитывая тяжесть последствий, которые могут произойти в случае возникновения аварийной ситуации, особое внимание при проведении испытаний уделяется обеспечению их безопасности. Поэтому, безусловно, необходимо расчетное обоснование режимов испытаний установок, особенно потенциально опасных. Для углубленного расчетного анализа создаются математические модели процессов в ЯЭУ и оборудовании и соответствующие расчетные программы, выполняется их тестирование и верификация. Моделирование должно предшествовать проведению натуральных экспериментальных исследований [1]. По сути, наряду с натурным экспериментом, для стендовой ЯЭУ должен проводиться вычислительный эксперимент, результаты которого, помимо апробации проведения режимов испытаний, позволяют выполнить интерпретацию результатов экспериментов, получить результаты в области параметров и режимов, недостижимых при натурном эксперименте в силу опасности или невозможности проведения. Таким образом, натурный и вычислительный эксперименты, естественно при преобладающей роли натурального, взаимно дополняя друг друга, позволяют получить более полные и представительные результаты испытаний ЯЭУ.

Особое внимание в ходе испытаний [1] уделяется исследованию поведения а.з., повышению их надежности. Это связано, прежде всего, с тем, что нигде, кроме как на наземных стендах, невозможно испытать полномасштабные а.з. в условиях реальной модели их эксплуатации, наметить и проверить пути повышения их кампании и срока службы.

Весь процесс комплексных испытаний [1] условно можно разделить на три этапа, не имеющих четко выраженных границ.

Основными задачами натурального эксперимента на первом этапе испытаний ЯЭУ на наземных стендах-прототипах являются: установление соответствия фактических технических характеристик установки (физических, теплотехнических, динамических и др.) проектным.

На втором этапе испытаний проводятся исследования работы установки по алгоритмам и в режимах эксплуатации, максимально приближенных к модели функционирования ЯЭУ. Проводятся комплексные исследования нейтронно-физических, теплогидравлических, динамических, химико-технологических и радиационных характеристик установки, выявляются возможности их улучшения.

На третьем этапе натуральных испытаний при работе установки по модели, соответствующей модели эксплуатации ЯЭУ, подтверждаются технические характеристики установок, оцениваются ресурсные характеристики и определяются показатели надежности ее работы.

Сформировавшаяся за 58 лет работы концепция и практика испытаний в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» (далее НИТИ) ЯЭУ предусматривает наряду с тщательной регистрацией всех экспериментальных данных, полученных во время испытаний, расчетную поддержку испытаний. Расчетное сопровождение испытаний необходимо для правильной интерпретации получаемых экспериментальных данных, для прогнозирования и обоснования проводимых испытательных режимов.

До настоящего времени ЯЭУ, испытываемые в НИТИ, имели в своем составе реакторы на тепловых и промежуточных нейтронах. Создание критического стенда (КС) и проведение на нем экспериментальных исследований нейтронно-

физических характеристик (НФХ) а.з. реактора с быстрым спектром нейтронов и газовым теплоносителем является началом нового этапа испытаний на стендах НИТИ реакторных установок. На следующем этапе работ планируются комплексные испытания реакторной установки опытного образца в составе стендовой установки испытательного комплекса. С учетом этого и в соответствии с отработанной в НИТИ концепцией испытаний [1] возникает потребность в разработке и верификации программных средств, предназначенных для сопровождения испытаний установок с РБН.

Созданный в НИТИ арсенал нейтронно-физических (комплекс программ (КП) САПФИР_95&RC [2, 3]) и теплогидравлических (расчетный код КОРСАР [4]) программных средств и расчетных технологий ориентирован, прежде всего, на водо-водяные реакторы транспортного назначения. О качестве этих расчетных средств говорит тот факт, что они с успехом применяются и для гражданской энергетики [5 – 7].

Технология расчета НФХ реакторов с тепловым спектром нейтронов строится на двухэтапной схеме. На первом этапе проводится расчет спектра нейтронов и изменения изотопного состава в процессе выгорания топлива в отдельных ячейках (фрагментах) реактора. На втором этапе с использованием малогрупповых констант, полученных на первом этапе, рассчитывается распределение плотности потока нейтронов (ППН) и энерговыделение в а.з. (уравнение переноса нейтронов в реакторе решается в малогрупповом диффузионном приближении).

В расчетных моделях РБН до недавнего времени было не принято выделять этап расчета пространственно-энергетического распределения нейтронов в ячейках (ввиду допущения об их физической гомогенности). Однако с целью снижения удельных капитальных вложений и эксплуатационных затрат на РБН [8] (стали использовать технические решения, направленные: на повышение эффективности РО СУЗ и отражателей, на выравнивание энерговыделения (путем профилирования загрузки топлива и поглотителя в а.з.)) усиливается физическая гетерогенность в современных конструкциях РБН. Возросшие требования в обоснование безопасности и, соответственно, точности расчета ЯЭУ (обусловленные прогрессом в области вычислительной техники и развития методов расчета реакторов) привели к необходимости учета гетерогенных эффектов в нейтронно-физических моделях РБН [9]. С учетом этого и на основе анализа существующих методик нейтронно-физического расчета РБН принято решение распространить технологию учета влияния гетерогенных эффектов, отработанную для расчетов реакторов с тепловым спектром, и для расчета РБН.

Применение такой схемы позволит ускорить сроки разработки комплексных расчетных моделей для РБН, которые планируется испытывать в НИТИ, поскольку при использовании КП САПФИР_95&RC в связке с расчетным кодом КОРСАР задача сопряженного нейтронно-физического и теплогидравлического расчета реакторной установки решается естественным образом по обоснованной и отработанной схеме.

Возможность расширения области применения КП САПФИР_95&RC на расчет НФХ а.з. реактора с быстрым спектром нейтронов продемонстрирована при моделировании экспериментов на КС «АКСАМИТ» [10]. В этой работе были проведены верификационные расчеты для проверки и обоснования алгоритмов КП САПФИР_95&RC в сравнении с реперными расчетами, выполненными по

специализированной версии программы MCU [11] - MCU-KOSMOS, и с результатами критических экспериментов.

Для целей диссертационной работы в этом комплексе была использована модифицированная версия программы САПФИР_95 – САПФИР_РФ [12]. Относительно предыдущей версии программа САПФИР_РФ использует новые библиотеки нейтронных констант, подготовленные на основе оцененных ядерных данных (ОЯД) (Российских файлов оцененных нейтронных данных (РОСФОНД) и ENDF/B-VII), а также модернизированный блок расчета выгорания, позволяющий учитывать порядка 400 нуклидов.

Подводя итоги вышесказанному, следует придать очертание цели настоящей работы, которая заключается в разработке и верификации моделей расчета НФХ малогабаритных реакторов с быстрым спектром нейтронов. Разрабатываемая нейтронно-физическая расчетная модель должна обеспечивать все три упомянутые выше этапа испытаний РБН на стендах НИТИ. В полном объеме модель должна включать нейтронно-физический блок, теплофизический блок и блок системы регулирования.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка и верификация моделей расчета НФХ малогабаритных реакторов с быстрым спектром нейтронов.

Для достижения данной цели в диссертационной работе решены следующие задачи.

- Проведен анализ ранее созданных методик расчета НФХ РБН, а также выполнен обзор современных программных кодов и определено направление их модификации для проведения оптимизационных расчетов.
- Для малогабаритного реактора с быстрым спектром нейтронов разработана, обоснована и применена в практических расчетах схема двухэтапного расчета НФХ (ранее использовавшаяся только для реакторов с тепловым и промежуточным спектром нейтронов) с использованием модели КП САПФИР_РФ&РС.
- Разработана модель для теоретического анализа, расчетных исследований и сопровождения экспериментальных исследований НФХ а.з. реактора с быстрым спектром нейтроном и газовым теплоносителем.
- С использованием экспериментальных данных и реперных расчетов по методу Монте-Карло (подготовлена модель с использованием программы MCU-FR) выполнена верификация расчетной модели КП САПФИР_РФ&РС.

Научная новизна

Научная новизна результатов, полученных в диссертационной работе, заключается в следующем:

- впервые на практике в рамках одного КП успешно применена схема двухэтапного расчета НФХ для реакторов с быстрым спектром нейтронов, которая ранее использовалась только для расчетов НФХ реакторов с тепловым и промежуточными спектрами нейтронов;
- схема двухэтапного расчета позволила учесть в нейтронно-физической модели реальную геометрическую структуру конструктивных элементов,

- разнообразие физических свойств материалов и особенности методологии экспериментов по измерению реактивности;
- разработана и верифицирована нейтронно-физическая модель для численного моделирования экспериментов по определению эффективности рабочих органов (РО) системы управления и защиты (СУЗ);
 - на основе расчетного моделирования экспериментов по определению эффективности РО СУЗ проанализированы особенности методики измерений реактивности, связанные с влиянием пространственных эффектов, постоянного внешнего источника нейтронов, неопределенности ОЯД по параметрам запаздывающих нейтронов и сделаны рекомендации по оценке реактивности с исключением указанных факторов;
 - на основе сопоставления результатов вычислительных экспериментов с использованием ОЯД из файлов библиотек ENDF/B-V, ENDF/B-VI, ENDF/B-VII, БНАБ-78, РОСФОНД и результатами измерений установлено, что наилучшее согласие с результатами измерений реактивности достигается при использовании параметров запаздывающих нейтронов из библиотек БНАБ-78 и РОСФОНД.

Теоретическая и практическая значимость

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- 1) в ходе расчетных исследований было обосновано применение КП САПФИР_РФ&РС для разработки расчетной модели а.з. реактора с быстрым спектром нейтронов и газовым теплоносителем;
- 2) с использованием трехмерной нейтронно-физической модели КП САПФИР_РФ&РС:
 - выполнено сопровождение экспериментальных исследований НФХ а.з. реактора с быстрым спектром нейтроном и газовым теплоносителем;
 - исследовано влияние методических погрешностей (неопределенности параметров запаздывающих нейтронов, пространственных эффектов и постоянного внешнего источника нейтронов) на результаты измерений реактивности.

Результаты выполненных расчетных исследований позволили правильно интерпретировать экспериментальные данные и использовать их для верификации расчетной модели.

Апробация работы и публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в трех работах [13 – 15]. Две из них являются статьями в журнале из перечня ВАК ведущего российского рецензируемого научно-технического издания: «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник» [13, 14].

Представление научного доклада: основные положения

- Обоснование применения технологии расчета НФХ реакторов с быстрым спектром нейтронов на основе двухэтапной схемы с использованием КП САПФИР_РФ&РС.

- Разработка и верификация трехмерной нейтронно-физической модели а.з. реактора с быстрым спектром нейтронов и газовым теплоносителем.
- Исследование влияния методических погрешностей на результаты эффективности РО СУЗ.

Личный вклад автора

Личный вклад автора в совместных исследованиях и работах заключается в следующем:

- проведен анализ ранее созданных методик расчета НФХ РБН, а также выполнен обзор современных программных кодов и определено направление их модификации для проведения оптимизационных расчетов;
- разработана трехмерная нейтронно-физическая модель с использованием КП САПФИР_РФ&РС для теоретического анализа, расчетных исследований и сопровождения экспериментальных исследований НФХ а.з. реактора с быстрым спектром нейтронов и газовым теплоносителем;
- с использованием экспериментальных данных и реперных расчетов по методу Монте-Карло (подготовлена модель с использованием программы MCU-FR) выполнена верификация расчетной модели КП САПФИР_РФ&РС.
- выполнены расчетные исследования для а.з. реактора с быстрым спектром нейтронов и газовым теплоносителем с целью:
 1. выбора оптимального числа энергетических групп при подготовке расчетной модели КП САПФИР_РФ&РС;
 2. оценки вклада погрешности от параметров запаздывающих нейтронов, используемые при моделировании экспериментов по определению эффективности РО СУЗ;
 3. оценки влияния пространственных эффектов на результаты измерений реактивности;
 4. оценки влияния постоянного внешнего источника нейтронов на результаты измерений реактивности;
 5. сравнения результатов моделирования эффективности РО СУЗ с методом асимптотического периода.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 104 наименований, содержит 86 страниц, 11 таблиц и 21 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена литературному обзору, в котором описывается история развития точности расчетов НФХ реакторов. В обзоре изложены и отмечены наиболее значимые, по мнению автора, работы, которые позволили выйти на качественно новый уровень в получении гарантированной точности рассматриваемых характеристик.

За последние шестьдесят лет были разработаны и развиты различные методы решения кинетического уравнения, а также предложены и применены отличные друг от друга способы учета резонансной самоэкранировки при подготовке библиотек нейтронных констант. Возросшие возможности вычислительной техники и увеличение объема экспериментальной информации, в этот период

времени, сопутствовали развитию константного и программного обеспечения, следствием чего стало повышение точности расчетов НФХ реакторов.

В обзоре были представлены:

- два КП CONSYST/БНАБ и NJOY-B30, с использованием которых подготавливаются библиотеки многогрупповых констант на основе файлов ОЯД;
- программные средства для расчета НФХ реакторов с быстрым, промежуточным и тепловым спектрами нейтронов.

Главным критерием в пользу выбора КП САПФИР_95&RC для подготовки расчетных моделей малогабаритных реакторов с быстрым спектром нейтронов является реализация задач испытаний и отработки на стендах НИТИ различных типов, новых и перспективных ЯЭУ. Для этого требуются соответствующие технологии, способные обеспечить комплексную направленность ведущихся на стенде работ, позволяющие подвергнуть системному анализу результаты испытаний на всем жизненном цикле ЯЭУ. Исходя из этих соображений, особенно актуальным является модернизация КП САПФИР_95&RC, что в конечном счете приведет к разработке новых методик, алгоритмов и вычислительных кодов, в которых будут учитываться при подготовке библиотек малогрупповых констант особенности реакторов с любыми спектрами нейтронов (быстрым, промежуточным и тепловым). Создание в будущем универсального программного средства позволит упростить процедуру проведения расчетов, а также решить одну из важнейших научно-технических проблем в реакторной физике, связанную с проведением надежных, сертифицированных, высокоточных расчетов НФХ реакторов, с использованием верифицированного константного обеспечения созданного на основе файлов РОСФОНД [16, 17].

Во **второй главе** представлены описание и результаты тестирования разработанной автором модели, подготовленной с использованием КП САПФИР_РФ&RC, для расчета НФХ а.з. реактора с быстрым спектром нейтронов и газовым теплоносителем. Представлены результаты верификации расчетной модели при моделировании НФХ быстрой критической сборки: коэффициентов размножения, эффективности РО СУЗ и распределений энерговыделения по а.з. [13, 15]. Результаты расчетов, полученные с использованием КП САПФИР_РФ&RC, сопоставляются с реперными расчетами.

Для расчета НФХ а.з. КС и моделирования экспериментов использовалась трехмерная диффузионная программа RC, в двухгрупповом приближении, решающая уравнение диффузии нейтронов с использованием малогрупповых констант, подготовленных программой САПФИР_РФ.

В модели программы RC а.з., отражатель и стержни РО СУЗ моделируются шестигранными призмами с шагом твэлов в а.з. Свойства материалов шестигранных призм заданы так, чтобы сохранить массу и объем веществ. На рис. 1 схематически представлена картограмма а.з. и отражателя, использованная в расчетной модели программы RC.

Программа САПФИР_РФ использует многогрупповую рабочую библиотеку, подготовленную на основе РОСФОНД [16, 17]. С её помощью проведен расчет эффективных характеристик ячеек и подготовлена библиотека этих характеристик (констант) для уравнения диффузии нейтронов, решаемого программой RC. Разделение по энергии между группами выбрано на границе областей разрешенных и неразрешенных резонансов: первая группа от 10.5 МэВ до 10.0 кэВ, вторая

группа от 10.0 кэВ и ниже в соответствии с границами с 1 по 11 группы и с 12 по 26 группы системы БНАБ [18], используемой в программе САПФИР_РФ.

Подготовка мало групповых характеристик ячеек (коэффициентов уравнения диффузии нейтронов) осуществлена в два этапа. На первом этапе на основе файлов ОЯД с учетом специфики а.з. подготовлена многогрупповая рабочая библиотека для программы САПФИР_РФ, которая решает уравнение переноса нейтронов в многогрупповом приближении. На втором этапе с использованием программы САПФИР_РФ в элементах а.з. и отражателя рассчитан двадцати шести групповой спектр нейтронов, с весом которого усреднены сечения в две энергетические группы для эффективных зон, соответствующих этим элементам.

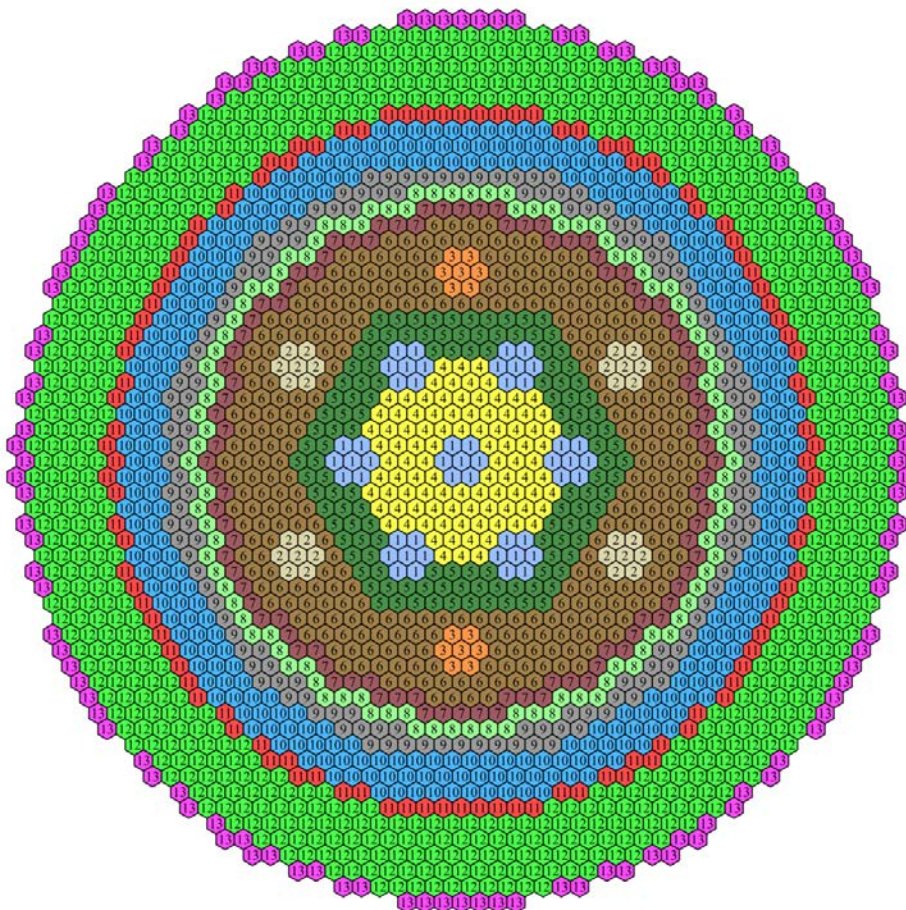


Рис. 1. Расчетная модель активной зоны и отражателя программы РС

Малые габаритные размеры реакторов приводят к большим утечкам нейтронов из а.з. В связи с этим в а.з. КС спектр нейтронов зависит как от свойств а.з., так и от состава и геометрии отражателя. На рис. 2 на примере одной из тестовых задач, имитирующих а.з. и отражатель КС, проиллюстрирована принятая в модели программы САПФИР_РФ схема разбиения а.з. и отражателя на эффективные зоны, для которых рассчитаны мало групповые константы. Разбиение на эффективные зоны выбрано так, чтобы спектр нейтронов и мало групповые константы в пределах эффективной зоны можно было принять постоянными. Для каждой из указанных на рис. 2 эффективных зон по программе САПФИР_РФ подготовлены мало групповые константы, которые затем использованы при расчете по программе РС.

Тестирование расчетной модели включало два этапа. На первом этапе выверялась модель для расчета спектра нейтронов и мало групповых констант программы САПФИР_РФ, на втором этапе проверялась двухгрупповая трехмерная модель программы РС.

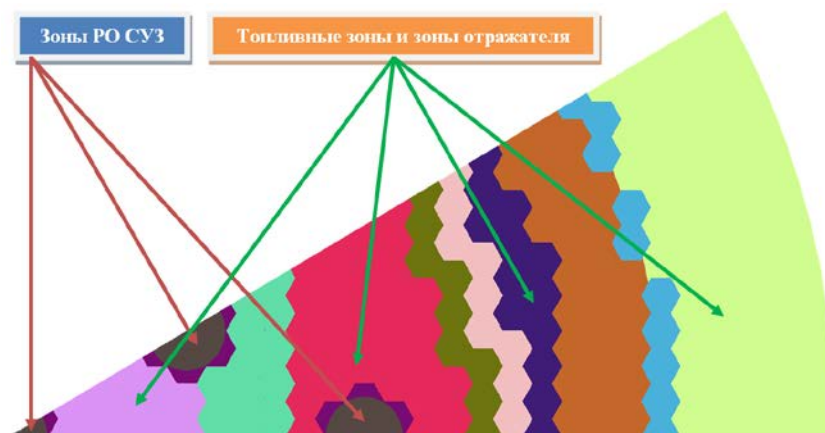


Рис. 2. Схема разбиения сектора симметрии 1/12 части активной зоны и отражателя на эффективные зоны

С использованием программы MCU-FR подготовлена серия тестовых задач, учитывающих особенности малогабаритных быстрых реакторов с газовым теплоносителем.

Результаты верификационных расчетов моделирования тестовых задач показали качественное и количественное согласие между программами САПФИР_РФ, MCU-FR при сопоставлении:

- коэффициента размножения при расчете бесконечных решеток (K_{∞}), состоящих из полячек а.з. РБН;
- скоростей ядерных реакций деления и захвата нейтронов для сравниваемых сред;
- коэффициента размножения $K_{\text{эфф}}$ при моделировании трехмерных тестовых задач с извлеченными и погруженными органами регулирования;
- распределения относительного энерговыделения в твэлах а.з. при моделировании двухмерных и трехмерных конфигураций а.з.

Результаты верификационных расчетов продемонстрировали возможности КП САПФИР_РФ&РС для проведения расчетов быстрых реакторов с газовым теплоносителем [13, 15].

В третьей главе приведены результаты исследований особенностей методологии экспериментов, проведенных в НИТИ по определению эффективности стержней РО СУЗ, осуществленных двумя способами: методом асимптотического периода, когда извлечение стержня приводит к экспоненциальному росту мощности с определенным установившимся периодом, который и характеризует величину введенной реактивности, и методом сброса стержня, приводящего к затуханию ППН со скоростью, зависящей от величины введенной отрицательной реактивности [14, 15]. Измерение реактивности проводилось методом обращенного решения уравнения кинетики (ОРУК). Известно, что при использовании этого метода на результаты измерений и их интерпретацию влияет ряд факторов, связанных с приближением точечной кинетики, на котором основан этот метод [19]. При всех достоинствах метод ОРУК имеет существенный недостаток: результаты измерения значительной отрицательной реактивности, с одной стороны, зависят от взаимного расположения детектора и РО СУЗ и, с другой, от времени после окончания перемещения и скорости перемещения РО СУЗ. Точечная же модель кинетики, как известно, основана на предположении неизменности пространственно-энергетического распределения нейтронов до, во время и после возмущения реактора.

В работах [19 – 23] предлагаются некоторые усовершенствования метода ОРУК с целью сведения к минимуму основных источников экспериментальной погрешности: неадекватности используемого набора параметров кинетики в методе ОРУК реальному составу а.з. (константная погрешность); задержки в формировании асимптотического распределения ППН (пространственные эффекты реактивности). В этих работах учет экспериментальной погрешности проводился с введением корректирующих параметров в результаты измерений.

Недостатком такого подхода является то, что методики введения поправок развиты для одного из факторов, приводящих к методической погрешности, в первую очередь для корректировки так называемых пространственных эффектов (зависимости результатов измерений относительно положения детекторов и места возмущения в а.з.). Однако, не учитывается возможное (одновременное) влияние иных факторов, влияющих на результаты измерений, связанных с методическими погрешностями иной природы и погрешностью измерений (просчеты при регистрации больших сигналов, влияние фоновых искажений при малых значениях сигналов). В результате, окончательный результат может оказаться искаженным. При этом после обработки результатов с использованием корректирующих методик теряется исходная экспериментальная информация, и оценить погрешность полученной оценки не представляется возможным.

Основная трудность при интерпретации результатов измерений реактивности методом ОРУК, представленных в диссертационной работе, была связана с тем, что на результаты измерений одновременно влияли несколько равновеликих факторов. Кроме пространственных эффектов в методическую погрешность вносил постоянный внешний источник нейтронов. Дополнительная неопределенность была связана с тем, что для РБН в литературе отсутствовала информация о влиянии неопределенности ОЯД по параметрам запаздывающих нейтронов на результаты измерений реактивности. Для анализа результатов экспериментов в работе использован подход, основанный на моделировании измерений с имитацией всех основных факторов и особенностей измерений.

Для того, чтобы оценить влияние приближения точечной кинетики на результаты измерений реактивности методом ОРУК, подготовлена нестационарная трехмерная расчетная модель а.з. Расчетное моделирование измерений дало возможность непосредственно сравнить экспериментальные и расчетные результаты при верификации расчетной модели и сделать обоснованное заключение о результатах определения эффективности РО СУЗ, полученных на основе обработки результатов экспериментов. С использованием КП САПФИР_РФ&РС были выполнены расчетные исследования для каждого источника методической погрешности, с целью определения его влияния на результаты измерений.

В эксперименте эффективность РО СУЗ определялась методом асимптотического периода и методом сброса стержня.

В методе сброса стержня интегральная эффективность стержней КР определялась следующим образом: сначала взводятся стержни АЗ, на полный ход взводится исследуемый стержень КР, 2 стержня АР и 6 стержней КР поочередно пошагово выводятся из а.з. до достижения критического состояния. Затем производится сброс исследуемого стержня в а.з.

При определении интегральной эффективности стержней АР взводятся стержни АЗ, на полный ход взводится исследуемый стержень АР, второй стержень АР поочередно пошагово выводится из а.з. на расстояние 16 см, 7 стержней КР

поочередно пошагово выводятся из а.з. до достижения критического состояния. Затем производится сброс исследуемого стержня АР в а.з.

В методе асимптотического периода измерения выполнялись при РО АЗ на верхних концевых выключателях. Сборка критическая выводилась в критическое состояние. Способ вывода – поочередное пошаговое перемещение РО КР и АР с выдержками между шагами до 100 с. В критическом состоянии скорость счета по каналам контроля ППН стабилизировалась на уровне 10^4 с^{-1} .

Оператор основного пульта управления для градуировки перемещал РО вверх на величину ΔH таким образом, чтобы значение периода (Т) по показаниям каналов контроля СУЗ составляло $\geq 100 \text{ с}$.

Надкритическое состояние сборки критической поддерживалось до выхода на скорость счета $\sim 0.5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$. Градулируемый РО возвращался в исходное критическое состояние.

Проводилась поочередная градуировка РО, при которой сборка критическая переводилась в подкритическое состояние посредством перемещения в а.з. любого из РО. После снижения скорости счета до $\sim 10^4 \text{ с}^{-1}$ сборка критическая стабилизируется в критическом состоянии.

По информации, зарегистрированной каналом нейтронно-физических исследований, определялось значение Т для каждого из каналов контроля ППН, и вычислялось изменение реактивности $\Delta\rho$ (с помощью реактиметра или уравнения «обратных часов»).

Дифференциальная эффективность РО определяется как $d\rho/dH = \Delta\rho/\Delta H$, где в качестве $\Delta\rho$ принимается среднее значение реактивности, полученное по всем измерительным каналам (трем ионизационным камерам (ИК) ИК-1, ИК-2 и ИК-3), регистрирующим изменение ППН. По скорости изменения ППН реактиметр вычисляет реактивность, используя ОРУК.

Интегральная эффективность стержней определялась путем интегрирования дифференциальных эффективностей (в методе асимптотического периода).

Оценка внесенного возмущения в единицах $\rho/\beta_{эфф}$ определялась, как разность между показаниями реактиметра в начальном и конечном (установившемся) состояниях:

$$\Delta\rho_{реакт}^{экср} = \Delta\rho_{уст} = \rho_{уст} - \rho_0. \quad (1)$$

Выход в критическое состояние и эксперименты по измерению реактивности на КС проводились при наличии постоянного внешнего источника нейтронов. Это обстоятельство явилось одним из факторов, вносящих неопределенность в оценку реактивности с использованием соотношения (1). При небольших уровнях мощности внешний источник нейтронов влияет на скорость ее изменения и, соответственно, на оценку реактивности $\rho_{уст}$.

Кроме этого, вычисление реактивности методом ОРУК зависит от того, какой набор параметров запаздывающих нейтронов использовался в реактиметре при решении обращенного уравнения кинетики. Неопределенность оценки относительных долей выходов запаздывающих нейтронов в различных библиотеках ОЯД достаточно высока, и она может заметно влиять на показания реактиметра [22, 23]. Неопределенность в оценке абсолютной доли запаздывающих нейтронов по различным оценкам составляет 5 – 7% [23, 24]. Эта неопределенность проявляется, когда измеренную реактивность, пересчитанную в единицы $1/k_{эфф}$,

сопоставляют с результатами расчетов реактивности по стационарным программам.

Влияние вышеперечисленных факторов: неопределенности параметров запаздывающих нейтронов, пространственных эффектов и постоянного внешнего источника нейтронов, может приводить к тому, что оценка эффективности РО СУЗ методом ОРУК с использованием соотношения (1) может значительно отличаться от результата вычисления изменения реактивности через разность обратных значений коэффициента размножения в конечном и исходном состояниях:

$$\Delta\rho_{расч}^{стац} = \frac{1}{k_{эфф}^2} - \frac{1}{k_{эфф}^1}. \quad (2)$$

На основе только экспериментальных данных выделить каждую из составляющих методической погрешности измерений реактивности достаточно сложно. Чтобы при сопоставлении расчетных и экспериментальных данных избежать методической несогласованности определений (1) и (2), в КП САПФИР_РФ&РС реализована возможность моделирования экспериментов на основе решения нестационарного уравнения диффузии. Кроме того, КП САПФИР_РФ&РС дополнен блоком, имитирующим вычисление реактивности методом ОРУК, так же, как это делается на опыте с использованием штатного реактиметра.

Для расчета изменения ППН в программе РС решается нестационарное уравнение диффузии нейтронов:

$$\begin{aligned} \frac{1}{v^g} \frac{\partial}{\partial t} \Phi^g(\mathbf{r}, t) = \nabla D^g \nabla \Phi^g(\mathbf{r}, t) - \Sigma_t^g \Phi^g(\mathbf{r}, t) + \sum_{g' < g} \Sigma_s^{g' \rightarrow g} \Phi^{g'}(\mathbf{r}, t) + \\ + (1 - \beta) \chi_p^g \sum_{g'} v^{g'} \Sigma_f^{g'} \Phi^{g'}(\mathbf{r}, t) + \sum_{m=1}^M \lambda_m \chi_{d,m}^g C_m(\mathbf{r}, t) + Q(\mathbf{r}), \quad (3) \\ \frac{\partial}{\partial t} C_m(\mathbf{r}, t) = \beta_m \sum_g v^g \Sigma_f^g \Phi^g(\mathbf{r}, t) - \lambda_m C_m(\mathbf{r}, t) \quad (m = 1, \dots, M), \end{aligned}$$

где Φ^g – плотность потока нейтронов в g -й энергетической группе; $Q(\mathbf{r})$ – функция, имитирующая влияние внешнего источника нейтронов; v^g – скорость нейтронов в g -й группе; D^g – коэффициент диффузии в g -й группе; Σ_t^g – полное сечение увода нейтронов из g -й группы; $\Sigma_s^{g' \rightarrow g}$ – сечение перевода нейтронов из группы g' в группу g ; v^g – среднее число нейтронов, возникающее в одном акте деления; Σ_f^g – сечение деления в g -й группе; χ_p^g – доля мгновенных нейтронов деления, непосредственно попадающих в g -ю группу; $\chi_{d,m}^g$ – доля запаздывающих нейтронов от ядер-предшественников m -й группы, попадающих в g -ю энергетическую группу; β_m – доля запаздывающих нейтронов m -й группы нейтронов; $\beta = \sum_{m=1}^M \beta_m$ – полная доля запаздывающих нейтронов; λ_m – постоянная распада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов m -й группы; C_m – концентрация ядер-предшественников запаздывающих нейтронов m -й группы; M – число групп запаздывающих нейтронов.

При этом используется та же библиотека двухгрупповых констант (коэффициентов уравнения), что и для стационарного расчета [13, 15], дополненная

параметрами нейтронной кинетики, подготовленными по программе САПФИР_РФ на основе файлов ОЯД.

Изменение реактивности при моделировании эксперимента определялось путем численного решения обращенного уравнение кинетики [21]:

$$\frac{\rho(t)}{\beta_{эфф}} = 1 + \frac{\Lambda}{\beta_{эфф} I(t)} \frac{dI(t)}{dt} - \frac{1}{\beta_{эфф} I(t)} \sum_{m=1}^M \lambda_m \beta_m \int_0^t I(t') \exp[-\lambda_m(t-t')] dt' - \frac{\Lambda}{\beta_{эфф} I(t)} \sum_{m=1}^M \lambda_m C_m(0) \exp(-\lambda_m t) + Q / \beta_{эфф}. \quad (4)$$

В формуле использованы обозначения:

$\rho(t)$ - реактивность, Λ - время генерации мгновенных нейтронов, Q - внешний источник нейтронов.

$I(t)$ - результат моделирования изменения ППН в ИК.

В комплексе САПФИР_РФ&РС имеется блок, осуществляющий вычисление реактивности методом ОРУК (4). Он использовался в качестве реактиметра и при обработке зарегистрированных в экспериментах скоростей счета ИК, и при моделировании измерений с использованием КП САПФИР_РФ&РС.

При проведении расчетного моделирования измерений предполагалось, что основной вклад в показания ИК, расположенных за пределами а.з., вносят нейтроны деления от периферийных топливных стержней, расположенных на наименьшем расстоянии от ИК.

На рис. 3 приведена схема расположения трех ИК вокруг а.з. и номера топливных стержней, в которых рассчитывалось значение ППН при имитации показаний ИК.

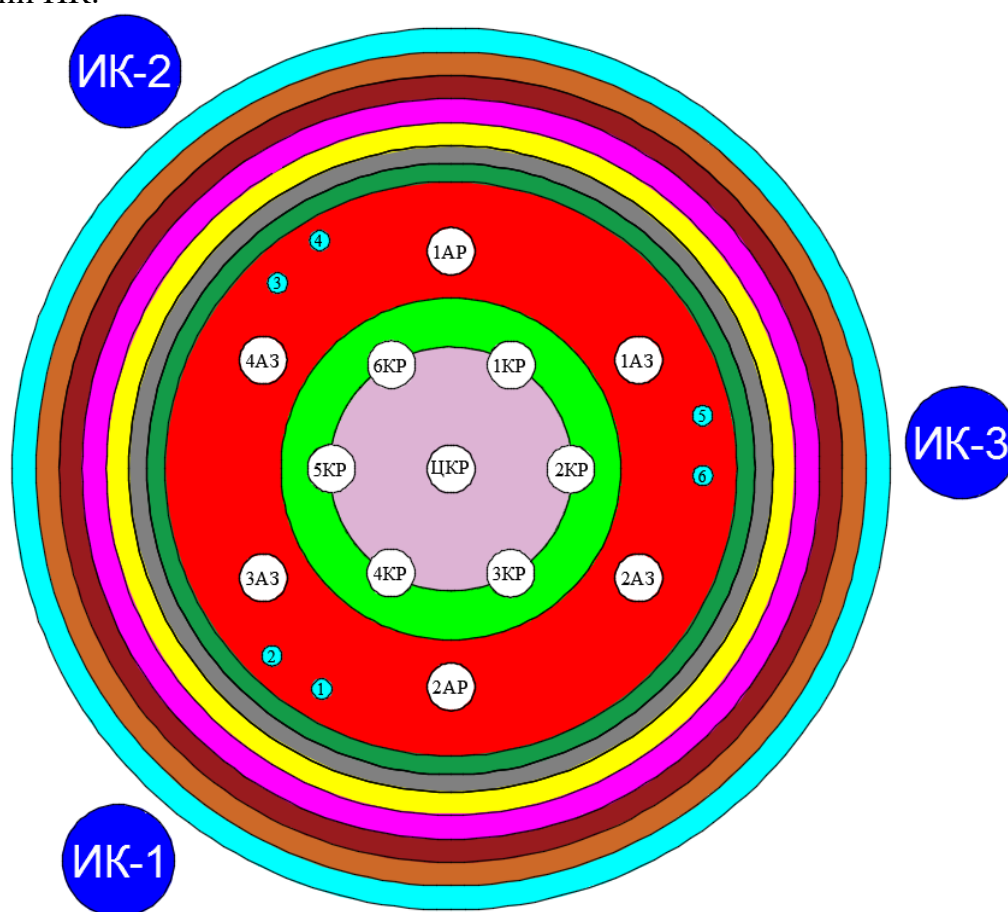


Рис. 3. Схема расположения ионизационных камер вокруг активной зоны и номера топливных стержней, в которых рассчитывалось значение плотности потока нейтронов

Из приведенной схемы видно, что ИК-1 соответствуют 1 и 2 топливные стержни, ИК-2 – 3 и 4 топливные стержни, и наконец, ИК-3 – 5 и 6 топливные стержни. Помимо этого, схема дает наглядную информацию о расположении стержней РО СУЗ относительно ИК и относительно друг друга в а.з.

Оценка вклада погрешности от параметров запаздывающих нейтронов

Используемые в уравнениях кинетики параметры запаздывающих нейтронов являются эффективными характеристиками изотопного состава топлива и должны вычисляться на основе детальных спектральных расчетов. При этом остается неопределенность, связанная с различием ОЯД.

Чтобы выявить чувствительность результатов измерений реактивности к параметрам запаздывающих нейтронов и определить наиболее подходящий набор для исследуемой быстрой критической сборки, использованы экспериментальные скорости счета (усредненные значения по показаниям трех ИК), зарегистрированные после сброса РО ЦКР в сочетании с разными моделями реактиметров, отличающимися параметрами запаздывающих нейтронов.

На рис. 4 приведены результаты для начального интервала времени после сброса РО ЦКР, когда влияние источника нейтронов в этом эксперименте было незначительным. В уравнениях реактиметра использованы пять наборов параметров запаздывающих нейтронов, рассчитанных программой САПФИР_РФ.

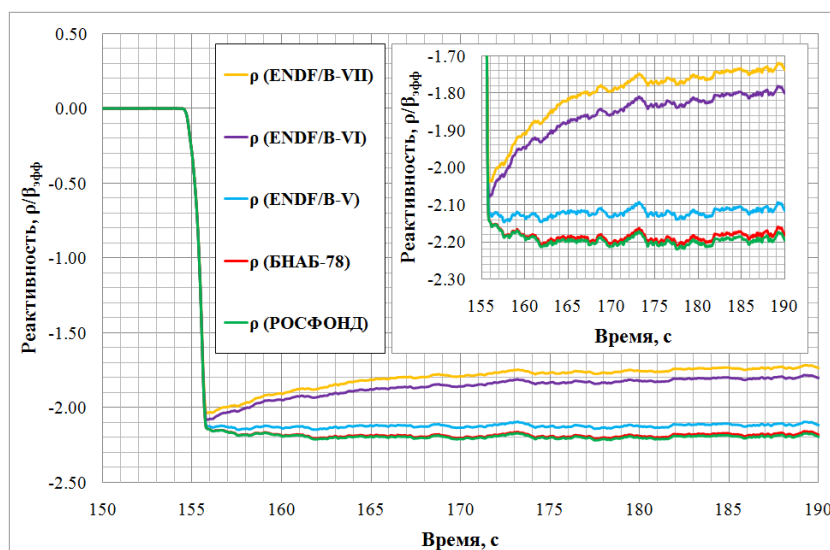


Рис. 4. Эксперимент. Изменение реактивности в эксперименте со сбросом РО ЦКР

Видно, что из-за различия ОЯД диапазон неопределенности результатов вычисления реактивности может достигать $\sim 20\%$: $1,74 \beta_{эфф}$ (ENDF/B-VII) и $2,19 \beta_{эфф}$ (БНАБ-78).

Для правильной оценки реактивности параметры запаздывающих нейтронов, используемые в реактиметре, должны отражать реальные свойства а.з. При этом если влияние пространственных эффектов и постоянного внешнего источника нейтронов незначительно, то после погружения стержней измеренная реактивность должна быть постоянной.

Этому условию удовлетворяют результаты, полученные при использовании в реактиметре параметров запаздывающих нейтронов из файлов ENDF/B-V, БНАБ-78 и РОСФОНД. В первых двух случаях данные получены на основе оценок Дж. Р. Кипина [25], соответственно, для реакторов с быстрым (ENDF/B-V) и тепловым (БНАБ-78) спектром нейтронов. При использовании в реактиметре восьмигрупповых параметров запаздывающих нейтронов, полученных из

РОСФОНД результаты вычисления реактивности, практически совпали с данными, полученными с шестигрупповыми параметрами из БНАБ-78 [18].

Из приведенных на рис. 4 данных можно сделать заключение, что критерию постоянства реактивности после сброса РО ЦКР не удовлетворяют зависимости, полученные при использовании параметров запаздывающих нейтронов из библиотек ОЯД ENDF/B-VI и ENDF/B-VII.

Для окончательного выбора наиболее подходящего набора параметров запаздывающих нейтронов проведено моделирование эксперимента с использованием в а.з. библиотек с параметрами кинетики, полученными на основе файлов БНАБ-78, ENDF/B-V и РОСФОНД. Для всех трех моделей получены достаточно близкие результаты моделирования эксперимента. Наилучшее согласие с результатами измерений получены при использовании параметров запаздывающих нейтронов из библиотек БНАБ-78 и РОСФОНД. Однако, в связи с тем, что нет явного выигрыша при обработке результатов измерений с использованием восьмигрупповых параметров запаздывающих нейтронов, поэтому в качестве базовой модели принято традиционное (шестигрупповое) представление для параметров запаздывающих нейтронов из библиотеки БНАБ-78.

На рис. 5 приведены результаты расчетного моделирования эксперимента со сбросом РО ЦКР при использовании в а.з. параметров запаздывающих нейтронов из библиотеки ОЯД БНАБ-78 и вычисления изменения реактивности методом ОРУК с использованием в уравнении реактиметра (4) различных наборов параметров запаздывающих нейтронов.

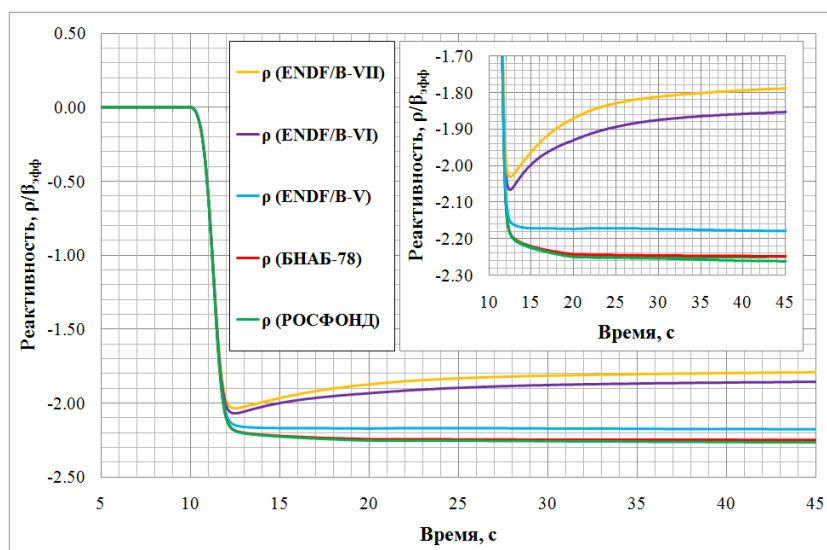


Рис. 5. Расчет. Модель с параметрами кинетики БНАБ-78. Изменение реактивности в эксперименте со сбросом РО ЦКР

Видно, что в этом случае результаты расчетного моделирования и качественно, и количественно воспроизводят экспериментальные зависимости, приведенные на рис. 4.

На основе анализа результатов эксперимента и расчетного моделирования в качестве базовой принята модель с параметрами запаздывающих нейтронов, подготовленная на основе файлов библиотеки БНАБ-78 по методике, описанной в работе [26]. Эти параметры использовались и при моделировании измерений, и при обработке результатов экспериментов.

Оценка влияния пространственных эффектов на результаты измерений реактивности

Для оценки влияния пространственных эффектов в качестве входного сигнала в блок реактиметра подавался сигнал, пропорциональный ППН в топливных стержнях, расположенных на периферии а.з. на границе с отражателем. Наиболее наглядно влияние пространственных эффектов видно при сопоставлении результатов измерений реактивности по показаниям скоростей счета трех ИК при сбросах стержней РО 1АР и 2АР (см. рис. 6).

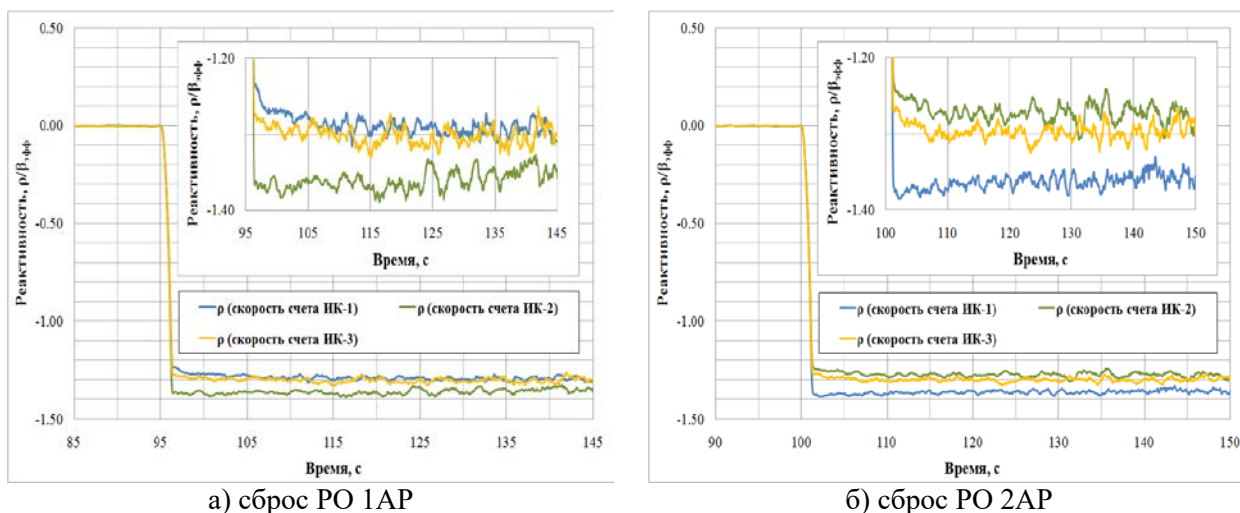


Рис. 6. Эксперимент. Реактивность, вычисленная по показаниям ИК-1, ИК-2 и ИК-3

В обоих экспериментах просматривается общая тенденция – максимальное изменение реактивности зарегистрировано ИК, наиболее близко расположенной к месту внесения возмущения (ИК-2 для РО 1АР и ИК-1 для РО 2АР).

Выявленные корреляции воспроизводятся и при расчетном моделировании. На рис. 7 приведены результаты моделирования экспериментов со сбросом РО 1АР и 2АР, при имитации показаний трех ИК. Реактивность вычислялась по изменению ППН в периферийных топливных стержнях а.з., расположенных напротив соответствующих ИК.

При сбросе РО ЦКР симметрия а.з. не нарушается и на основе только экспериментальных данных (по показаниям трех ИК) оценить влияние пространственных эффектов на результат измерения реактивности не представляется возможным (см. результаты измерений, приведенные на рис. 8а).

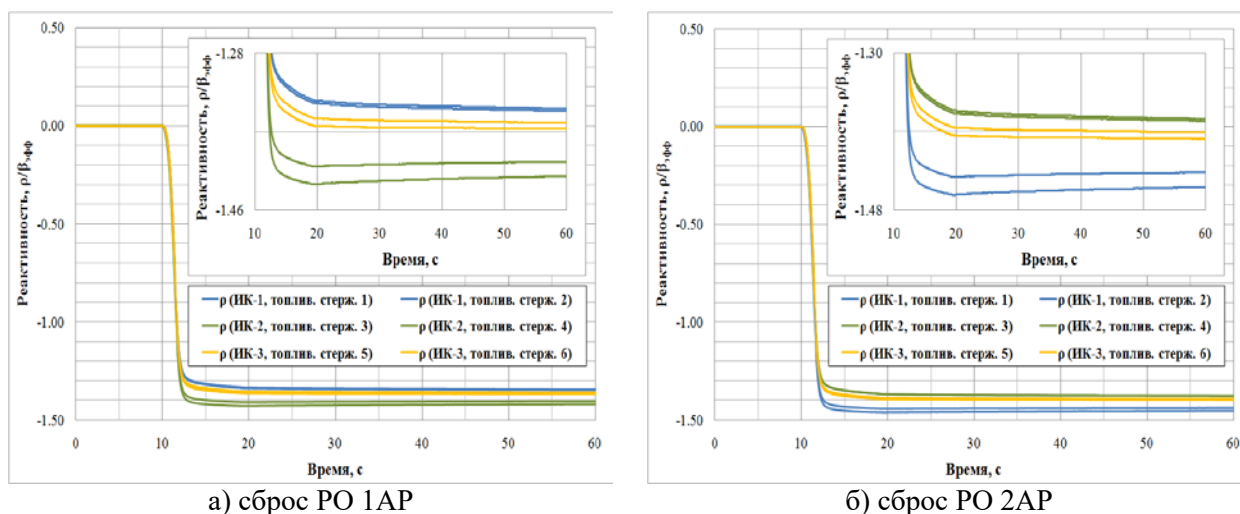
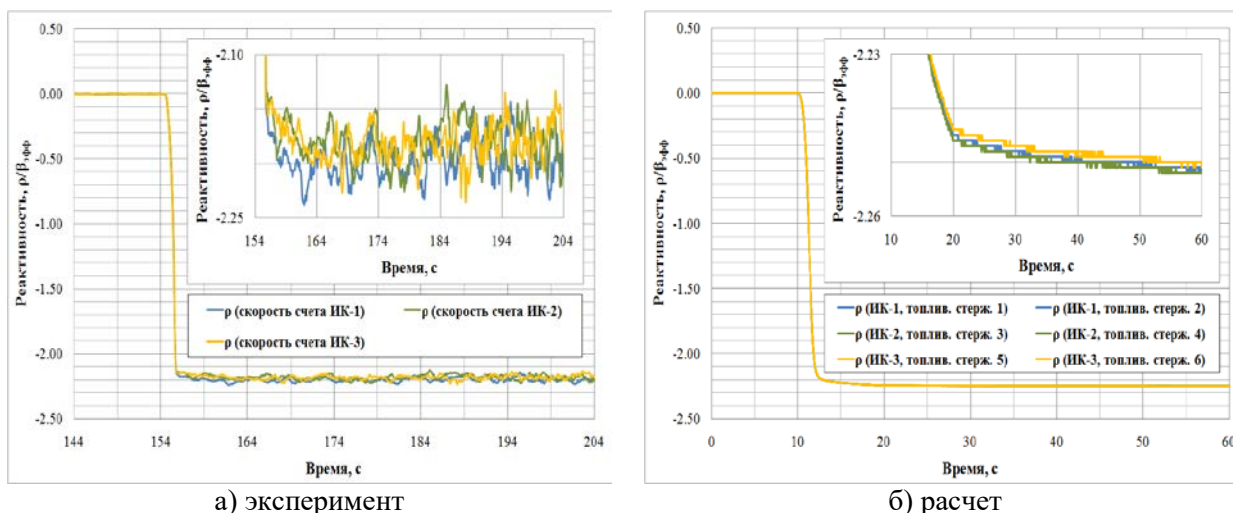


Рис. 7. Расчет. Реактивность, вычисленная по изменению ППН в периферийных топливных стержнях активной зоны, расположенных напротив ИК-1, ИК-2 и ИК-3

Для оценки пространственного эффекта выполнено расчетное моделирование этого эксперимента.



а) эксперимент б) расчет
Рис. 8. Изменение реактивности в эксперименте со сбросом РО ЦКР

Результат моделирования измерений (1) на основе решения прямого и обратного уравнений кинетики (3), (4) при сопоставлении с «истинной» реактивностью, вычисленной по разности значений коэффициентов размножения (стационарная модель (2)), позволяет расчетным путем оценить диапазон влияния пространственных эффектов на оценку эффективности РО.

В таблице 1 приведены результаты моделирования измерений (1) для экспериментов со сбросом РО ЦКР, 1АР и 2АР и результаты расчетов реактивности по разности значений коэффициента размножения (2). Результаты моделирования измерений получены путем вычисления реактивности по среднему значению ППН в шести топливных стержнях, имитирующих показания трех ИК вокруг а.з.

В расчетной модели КП САПФИР_РФ&РС использовались параметры запаздывающих нейтронов, подготовленные на основе библиотеки ОЯД БНАБ-78. Полученная при этом оценка $\beta_{эфф}$ использовалась при пересчете результатов стационарной модели (2).

Таблица 1 – Сопоставление результатов расчета реактивности при сбросах РО СУЗ

Сброс РО СУЗ	$\rho/\beta_{эфф}$		Отклонение, %
	Стационарная модель (2)	Моделирование измерений (1)	
ЦКР	-2.32	-2.25	-3.11
1АР	-1.42	-1.37	-3.65
2АР	-1.45	-1.41	-2.84

Результаты моделирования измерений (1) примерно на 3 – 4% систематически занижают оценку реактивности в сравнении с прямым расчетом. Это отличие дает количественную оценку влияния пространственных эффектов при измерении реактивности реактиметрами, подключенными к трем ИК и ее следует учитывать в дополнении к азимутальной неравномерности результатов измерений (см. рис. 6).

Оценка влияния источника нейтронов на результаты измерений реактивности

В настоящем разделе рассмотрено влияние постоянного внешнего источника нейтронов на результаты измерений реактивности в экспериментах со сбросом и извлечением РО ЦКР. Для компенсации влияния источника на результат измерения реактивности при решении уравнений в реактиметре предусмотрена возможность введения источника (см. уравнение (3)). Источник в уравнении реактиметра подбирается так, чтобы после внесения возмущения показания реактиметра образовали «полочку». Однако, данный способ корректировки предполагает отсутствие иных факторов, влияющих на показания реактиметра. Чтобы обосновать введение источника в реактиметр при обработке результатов измерений, использовано расчетное моделирование эксперимента. При моделировании экспериментов внешний источник нейтронов (см. уравнение (3)) задавался постоянным по времени и одинаковым во всех топливных стержнях а.з.

Наиболее наглядно влияние источника проявилось в эксперименте с извлечением РО ЦКР. На рис. 9 приведены результаты измерений реактивности и моделирования эксперимента, когда РО ЦКР поднимают вверх приблизительно на 30 мм. И в расчете, и в эксперименте результаты представлены для двух случаев. Зеленым цветом выделены результаты с введением в уравнение реактиметра (4) компенсирующего источника нейтронов (КИН), а красным – без источника. Кроме этого, расчетное моделирование выполнено также для модели, в которой отсутствовал источник нейтронов и при обработке результатов расчетов в модели реактиметра КИН не задавался. На рис. 9б эта зависимость показана черным цветом.

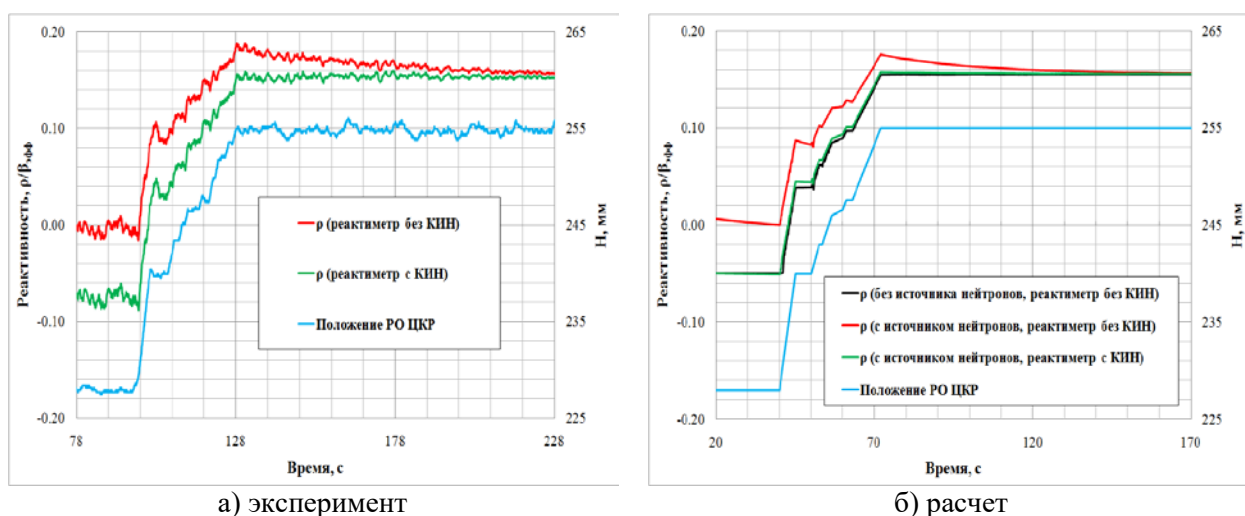


Рис. 9. Извлечение ЦКР с 228 до 255 мм. Влияние компенсирующего источника нейтронов в реактиметре на результаты вычисления реактивности

После достижения РО ЦКР максимального положения реактивность не меняется во времени. Выполнение этого критерия было условием при подборе КИН в реактиметре для обработки результатов расчетного моделирования эксперимента при наличии внешнего источника. Совпадение обоих результатов расчета явилось подтверждением корректности подбора величины КИН при расчетном моделировании эксперимента (см. рис. 9б). Требование постоянства реактивности после внесения возмущения было критерием подбора КИН и при обработке результатов измерений (см. рис. 9а).

Результаты расчетных исследований показали, что оценка изменения реактивности (1), вычисленная методом ОРУК с КИН на основе результатов

моделирования измерения и эксперимента по извлечению РО ЦКР достаточно хорошо согласуются с оценкой реактивности, полученной по разности значений коэффициента размножения (2), что явилось обоснованием использования метода ОРУК для оценки дифференциальной эффективности РО СУЗ в дополнение к методу асимптотического периода [19], который в программе испытаний на КС был основным.

На рис. 10 представлено сопоставление результатов моделирования измерения и эксперимента при сбросе РО ЦКР также для двух случаев: с КИН и без КИН. Величина КИН при моделировании этого эксперимента была принята той же, что в вышеописанном эксперименте.

При рассмотрении результатов, приведенных на рис. 10, видно, что при отсутствии КИН в реактиметре вычисленные значения реактивности, полученные при обработке результатов измерений и результатов расчетного моделирования приблизительно через 50с после сброса РО ЦКР, демонстрируют тенденцию к повышению. Однако с введением в реактиметр КИН вычисленная реактивность сохраняется постоянной, образуя характерную «полочку», которая наблюдается в эксперименте и в расчете.

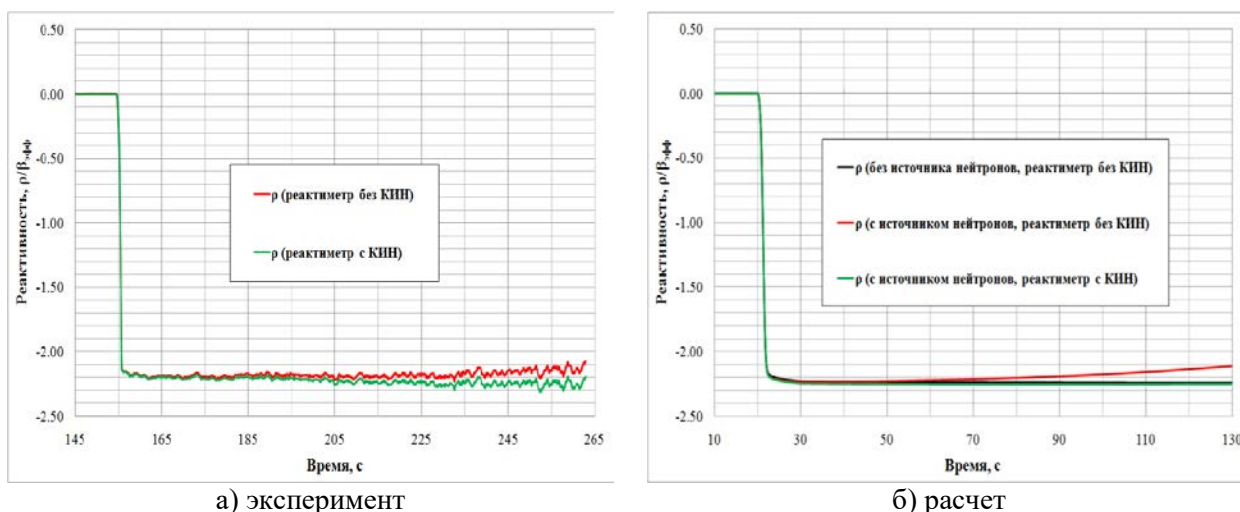


Рис. 10. Сброс РО ЦКР. Влияние компенсирующего источника нейтронов в реактиметре на результаты вычисления реактивности

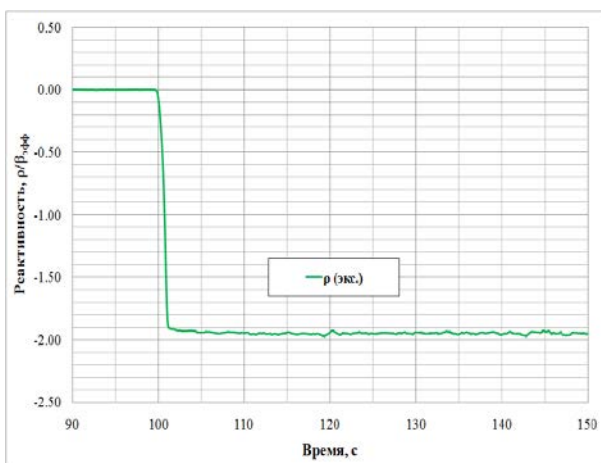
Приведенные результаты показывают, что введение в реактиметр КИН в обоих типах эксперимента позволяет надежно определить изменение реактивности с использованием соотношения (1) по разности показаний реактиметра до и после внесения возмущения.

Сопоставление результатов эксперимента и моделирования измерений

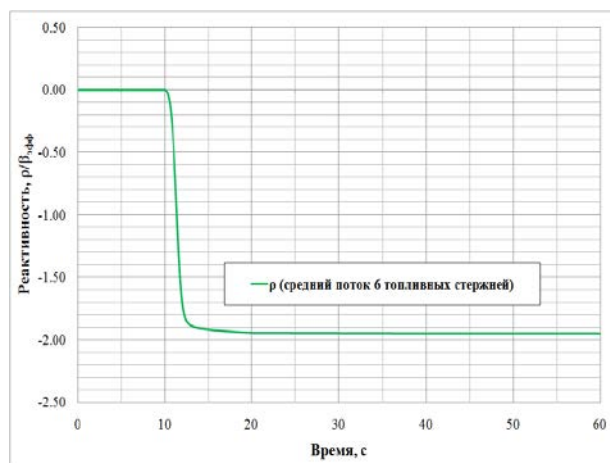
Для количественной оценки погрешности результаты расчетного моделирования измерений сопоставлены с результатами экспериментов по сбросам РО ЦКР, 1КР, 1АР и 2АР, а также с результатами экспериментов по извлечению РО ЦКР, 1КР, 1АР и 2АР. И в расчете, и в эксперименте изменение реактивности определялось в соответствии с соотношением (1) для установившегося значения реактивности, вычисленного с использованием КИН в реактиметре. При этом вычисление реактивности осуществлялось по средней скорости счета трех ИК при обработке экспериментальных данных и по средним значениям ППН в шести топливных стержнях, имитирующих показания трех ИК, при обработке результатов расчетного моделирования экспериментов.

На рис. 11, представлено сопоставление результатов моделирования измерения и эксперимента при сбросе РО 1КР.

На рис. 12 – 14 приведены, соответственно, извлечения РО 1КР (289 – 314 мм), 1АР (290 – 327 мм) и 2АР (226 – 258 мм).



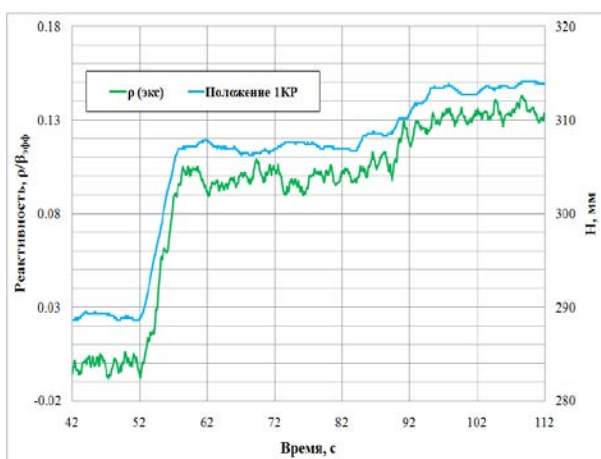
а) эксперимент



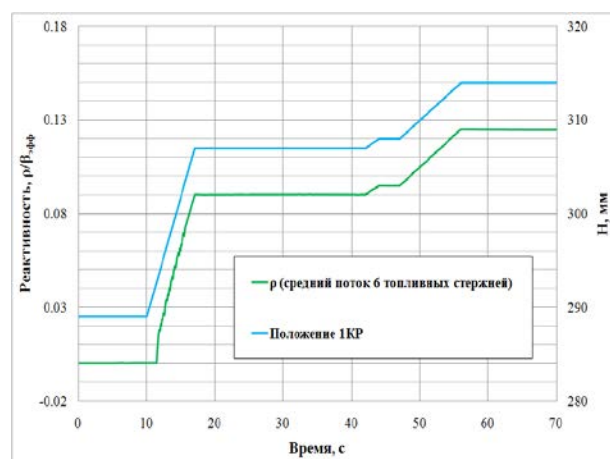
б) расчет

Рис. 11. Сброс РО 1КР

Полученные результаты изменения реактивности при сбросе РО 1КР демонстрируют согласие между экспериментом и расчетом.



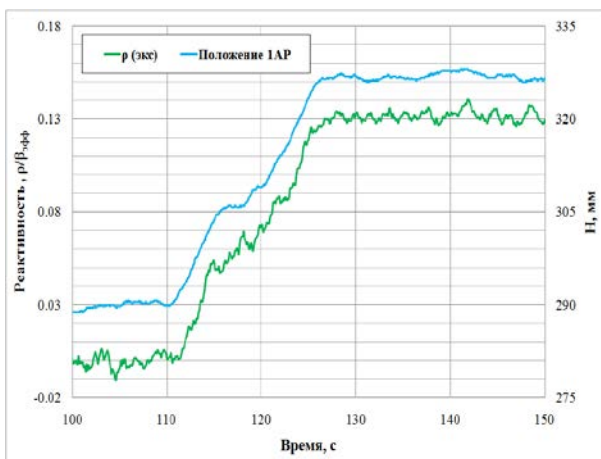
а) эксперимент



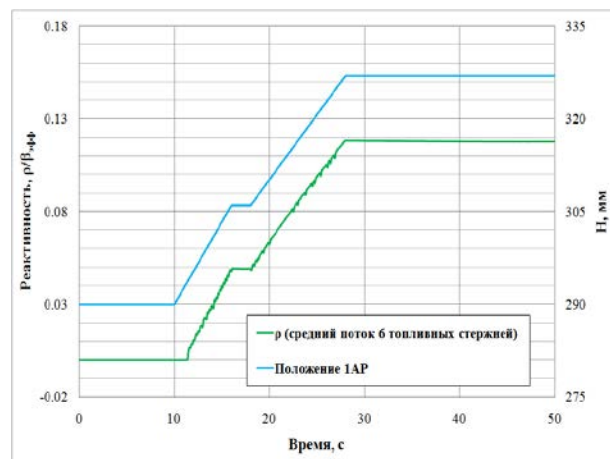
б) расчет

Рис. 12. Извлечение РО 1КР с 289 до 314 мм

Полученные в эксперименте и в расчете результаты извлечения РО 1КР с 289 до 314 мм согласуются друг с другом.



а) эксперимент



б) расчет

Рис. 13. Извлечение РО 1АР с 290 до 327 мм

Из приведенных результатов извлечения РО 1АР с 290 до 327 мм наблюдается согласие между экспериментом и расчетом.

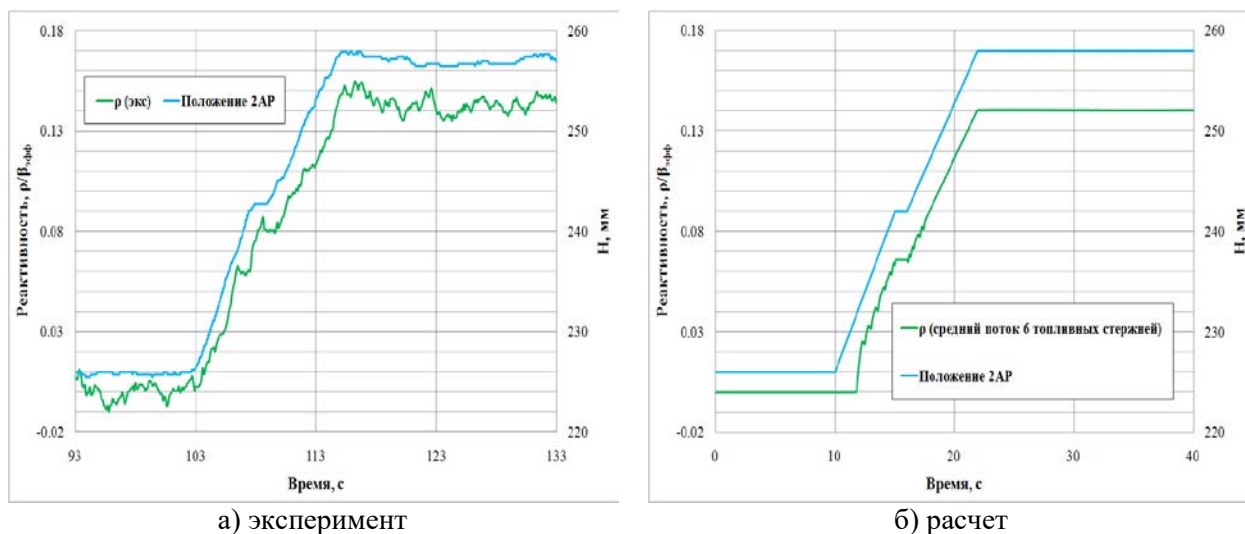


Рис. 14. Извлечение РО 2АР с 226 до 258 мм

Результаты извлечения РО 2АР с 226 до 258 мм, полученные в эксперименте и в расчете, согласуются.

В таблице 2 представлено сравнение результатов измеренных и расчетных значений реактивности при сбросах и извлечениях РО СУЗ.

Таблица 2 – Результаты изменения реактивности при сбросах и извлечениях РО СУЗ

РО СУЗ	$\rho/\beta_{эфф}$		Отклонение, %
	Эксперимент	Моделирование измерений (1)	
ЦКР (сброс)	-2.19	-2.25	2.74
1КР (сброс)	-1.95	-1.95	0.00
1АР (сброс)	-1.32	-1.37	3.79
2АР (сброс)	-1.31	-1.41	7.63
ЦКР (извлечение 228 – 255 мм)	0.227	0.205	-9.69
1КР (извлечение 289 – 314 мм)	0.134	0.125	-6.72
1АР (извлечение 290 – 327 мм)	0.131	0.118	-9.92
2АР (извлечение 226 – 258 мм)	0.143	0.140	-2.10

Из приведенных в таблице 2 результатов можно сделать вывод, что между моделированием измерения и экспериментом наблюдается удовлетворительное согласие. Отличие результатов моделирования измерений и экспериментальных данных не превосходит погрешность расчета дифференциальной эффективности КП САПФИР_ВВР95-РС для реакторов с тепловым спектром нейтронов 10% [3]. Различие может быть связано как с погрешностью расчетной модели, так и с точностью подбора КИН в реактиметре при обработке результатов измерений в натурном эксперименте и при расчетном моделировании измерений, поскольку к точности подбора КИН результаты моделирования и результаты измерений в экспериментах с извлечением РО СУЗ чувствительны.

Сопоставление результатов моделирования эффективности РО СУЗ с методом асимптотического периода

Метод асимптотического периода, принимая во внимание требования ядерной безопасности (период удвоения мощности не должен быть меньше ~ 10 с), можно использовать при измерениях реактивности от $+ 0.25\beta_{эфф}$ до $- 0.25\beta_{эфф}$. Малым реактивностям (положительным и отрицательным) соответствуют большие значения асимптотических периодов. Измерение больших периодов затруднено, с одной стороны, из-за нестабильности реактивности, обусловленной дрейфом или флуктуациями различных технологических параметров (температуры, механических смещений и пр.), с другой стороны, - при низких уровнях мощности флуктуацией ППН вследствие статистической природы процесса деления.

В уравнении 5 приведена рабочая форма при определении реактивности по периоду:

$$\rho \equiv (K_{эфф} - 1) / K_{эфф} = l / K_{эфф} T + \sum_i \beta_i \xi_i / (1 + \lambda_i T), \quad (5)$$

вместо времени генерации Λ чаще вводят время жизни мгновенных нейтронов l . Последние величины связаны между собой соотношением $l = K_{эфф} \Lambda$.

При $K_{эфф} > 1$ временное поведение мощности реактора может быть представлено в виде суммы экспонент (см. уравнение 6) [25], причем шесть экспонент имеют отрицательные показатели, а одна $-\omega_0$ – положительный.

$$N(t) = \sum_{i=1}^7 A_i \exp(\omega_i t). \quad (6)$$

Поэтому по прошествии некоторого времени рост мощности реактора может быть описан одной экспонентой, показатель которой $\omega_0 = 1/T$ связан с реактивностью простым соотношением

$$\rho / \beta_{эфф} = \Lambda / \beta_{эфф} T + \sum_i \beta_i \xi_i / (1 + \lambda_i T) \cdot \beta_{эфф}. \quad (7)$$

Первым членом в правой части можно пренебречь, так как даже в реакторах на тепловых нейтронах, где Λ может достигать 10^{-3} с., величина $\Lambda / \beta_{эфф} T$ не превышает 1% второго члена при $T \geq 10$ с. Поэтому без потери точности запишем соотношение (7) в следующем виде:

$$\frac{\rho}{\beta_{эфф}} = \sum_{i=1}^6 \xi_i a_i / (1 + \lambda_i T). \quad (8)$$

Из соотношения (7), (8) следует, что для определения реактивности в единицах $\beta_{эфф}$ по асимптотическому периоду необходимо знать λ_i , a_i , ξ_i и T .

Параметры кинетики λ_i и a_i были вычислены по программе САПФИР_РФ.

В работе [25] коэффициент относительной эффективности ξ_i для каждого из спектров групп запаздывающих нейтронов был вычислен в предположении, что $\xi_i \beta_i / \beta_{эфф} = \beta_i / \beta = a_i$, где a_i – парциальные доли групп запаздывающих нейтронов. Обусловленные таким приближением погрешности, незначительны.

Искомый период, являющийся последней неизвестной переменной для определения реактивности, может быть определен по последовательным отсчетам детектора в заданных временных интервалах. Если скорость счета пропорциональна мощности реактора, то за время изменения от t_i до $t_i + \Delta t$ будет зарегистрировано импульсов

$$N_{di} = \int_{t_i}^{t_i+\Delta t} \varepsilon \omega_0 \exp\left(\frac{t}{T}\right) dt = \varepsilon \omega_0 \left[\exp\left(\frac{t_i + \Delta t}{T}\right) - \exp\left(\frac{t_i}{T}\right) \right] T, \quad (9)$$

а за следующий интервал

$$N_{d,i+1} = \varepsilon \omega_0 T \left[\exp\left(\frac{t_i + 2\Delta t}{T}\right) - \exp\left(\frac{t_i + \Delta t}{T}\right) \right]. \quad (10)$$

Из отношения числа зарегистрированных импульсов в двух последовательных интервалах находим период

$$T_i = \Delta t / \ln [N_{d,i+1} / N_{d,i}]. \quad (11)$$

Среднее значение периода за время измерения t можно определить как

$$\langle T \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i.$$

Исходя из вышеперечисленных формул, были определены периоды и, соответственно, реактивности при извлечении РО СУЗ. В формуле (11) при вычислении периода использовалось среднее значение ППН шести топливных стержней расположенных на периферии а.з. напротив трех ИК (см. рис. 3).

На рис. 15 представлено значение периода при извлечении РО ЦКР с 228 до 255 мм. Фиолетовым цветом выделены промежутки времени (от 170 до 240 с.) за которые были определены средние значения периода при наличии и отсутствии источника нейтронов. В этом промежутке времени наличие источника уже не играет никакой роли, так как значение периода стало асимптотическим, и соответственно, периоды согласуются друг с другом. В данном случае, время выдержки от момента изменения состояния реактора до начала измерения периода составило ~ 100 с. Преждевременные измерения периода дают меньшее его значение по сравнению с асимптотическим, т.е. завышают измеряемую реактивность. С этой точки зрения метод обладает «повышенной» ядерной безопасностью. Чем меньше реактивность, тем больше период и тем больше должно быть время выдержки для измерения периода с заданной точностью [19].

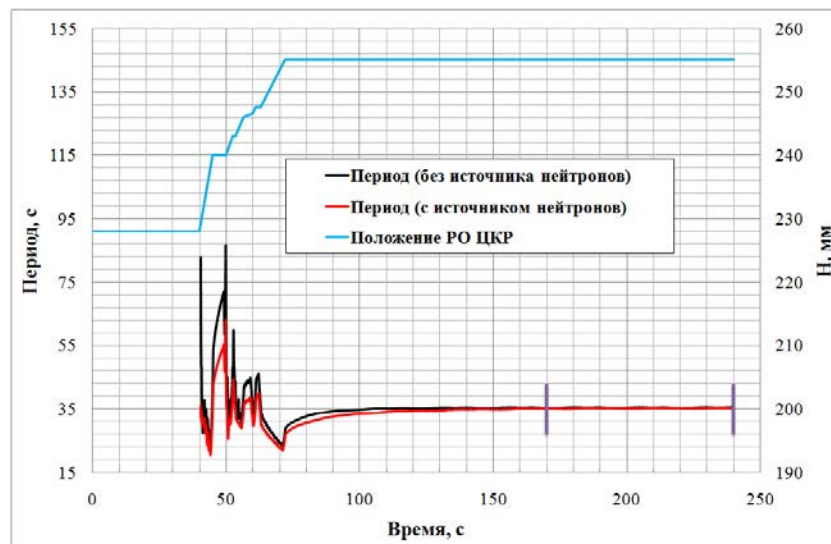


Рис. 15. Значение периода при извлечении РО ЦКР с 228 до 255 мм

В таблице 3 представлены результаты изменения реактивности при извлечении РО СУЗ по методу асимптотического периода в сравнении с результатами моделирования измерений (1).

Таблица 3 – Результаты изменения реактивности при извлечении РО СУЗ

РО СУЗ	$\rho/\beta_{эфф}$		Отклонение, %
	Метод асимптотического периода	Моделирование измерений (1)	
ЦКР (извлечение 228 – 255 мм)	0.205	0.205	0.00
1КР (извлечение 289 – 314 мм)	0.125	0.125	0.00
1АР (извлечение 290 – 327 мм)	0.118	0.118	0.00
2АР (извлечение 226 – 258 мм)	0.140	0.140	0.00

Приведенные результаты демонстрируют полное согласие между методом асимптотического периода и моделированием измерений (1), что, как следствие, является подтверждением достоверности полученных результатов по КП САПФИР_РФ&РС с использованием нестационарной трехмерной расчетной модели а.з.

Результаты, представленные **в настоящей главе**, на основе моделирования натуральных экспериментов, выполненных на КС НИТИ, подтвердили возможность разработки нестационарных расчетных моделей а.з. малогабаритных реакторов с быстрым спектром нейтронов на основе оригинальных алгоритмов КП САПФИР_РФ&РС [13 – 15].

С использованием расчетной модели КП САПФИР_РФ&РС, имитирующей особенности экспериментов, проанализировано влияние трех источников методической погрешности (неопределенности параметров запаздывающих нейтронов, пространственных эффектов и постоянного внешнего источника нейтронов), влияющих на результаты измерений реактивности методом ОРУК. Результаты выполненных расчетных исследований позволили правильно интерпретировать экспериментальные данные и использовать их для верификации расчетной модели.

Следует подчеркнуть, несмотря на то, что результаты, полученные по методу асимптотического периода, полностью согласуются с результатами моделирования измерений, при интерпретации экспериментальных данных, полученных на КС НИТИ, выбор в пользу второго подхода был сделан по следующим соображениям:

- 1) по методу асимптотического периода нельзя определить начальное значение реактивности и, соответственно, вычислить чему равно $\Delta\rho$;
- 2) по методу асимптотического периода не представляется возможным оценить вклад погрешности от пространственных эффектов и наличия постоянного внешнего источника нейтронов в экспериментах по определению эффективности РО СУЗ.

Таким образом, была подготовлена нестационарная трехмерная расчетная модель а.з. с использованием КП САПФИР_РФ&РС для расчетного моделирования экспериментов по определению эффективности РО СУЗ на КС НИТИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлены результаты первого этапа натурных испытаний, на которых проверялось соответствие фактических характеристик стендовой установки проектным.

Результаты диссертационной работы [13 – 15] являются первым этапом верификации и валидации расчетных моделей КП САПФИР_РФ&РС применительно к расчету НФХ малогабаритных реакторов с быстрым спектром нейтронов.

На следующем этапе испытаний планируются исследования работы установки по алгоритмам и в режимах эксплуатации, максимально приближенных к модели функционирования ЯЭУ. Будут проведены комплексные исследования нейтронно-физических, теплогидравлических, динамических, химико-технологических и радиационных характеристик установки, а также выявлены возможности их улучшения.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. Подготовка и верификация модели для расчета нейтронно-физических характеристик активных зон реакторов с быстрым спектром нейтронов и газовым теплоносителем / В.Г. Артемов, А.С. Иванов, П.А. Михеев, **Н.С. Нерсесян** // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. – 2020. – Вып. №1 (19). – С. 29-39.
2. Моделирование экспериментов по определению эффективности органов регулирования на критическом стенде с быстрым спектром нейтронов / В.Г. Артемов, Л.М. Артемова, Р.Э. Зинатуллин, А.С. Карпов, **Н.С. Нерсесян** // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. – 2020. – Вып. №2 (20). – С. 27-40.

Публикации в других изданиях

1. Подготовка и верификация модели для расчета нейтронно-физических характеристик активных зон реакторов с быстрым спектром нейтронов и газовым теплоносителем / В.Г. Артемов, А.С. Иванов, П.А. Михеев, **Н.С. Нерсесян** // Годовой отчет 2019 год / ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»; гл. ред. В.А. Василенко. – Сосновый Бор, 2020. – С. 79-86.

Список литературы

1. *Василенко В.А.* Концепция и технология комплексных испытаний судовых ядерных энергетических установок на наземных стендах-прототипах. – СПб.: ООО «НИЦ Моринтех», 2003. – 168 с.
2. Программа САПФИР_ВВР95 с библиотекой констант БНАБ-78/С-95: аттестационный паспорт ПС №260 от 23.09.2009.
3. Комплекс программ САПФИР_ВВР95-RC: аттестационный паспорт ПС №261 от 23.09.2009.
4. КОРСАР/ВР: аттестационный паспорт ПС №355 от 17 апреля 2014.
5. Программа САПФИР_95.1 с библиотекой констант БНАБ-78/С-95: аттестационный паспорт ПС №390 от 16.12.2015.
6. Комплекс программ САПФИР_95&RC_ВВЭР: аттестационный паспорт ПС №388 от 16.12.2015.
7. КОРСАР/ГП: аттестационный паспорт ПС №263 от 23.09.2009.
8. Казачковский О.Д. Реакторы на быстрых нейтронах – взгляд в будущее / О.Д. Казачковский // Атомная энергия. – 1987. – Т. 63. – Вып. 5. – С. 299-306.
9. Безбородов А.А. Создание программно-математического обеспечения и расчетные исследования гетерогенных эффектов в критических сборках и реакторах на быстрых нейтронах: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 05.13.18 / Александр Александрович Безбородов; АО «ГНЦ РФ-ФЭИ». – Обнинск, 1999. – 147 с.
10. Результаты верификации комплекса программ САПФИР_95&RC при моделировании экспериментов на критическом стенде «АКСАМИТ» / В.Г. Артемов, А.С. Иванов, Р.Э. Зинатуллин, А.С. Карпов // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. – 2017. – Вып. №3 (9). – С. 18-25.
11. Статус МСУ-5 / Н.И. Алексеев [и др.] // Вопросы атомной науки и техники: Серия Физика ядерных реакторов. – 2011. – Вып. 4. – С. 4-23.

12. *Иванов А.С.* Модернизация нейтронных библиотек и программы САПФИР_95, предназначенной для расчёта ячеек реактора / А.С. Иванов, А.С. Карпов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2018. – Вып. 1. – С. 27–34.
13. Подготовка и верификация модели для расчета нейтронно-физических характеристик активных зон реакторов с быстрым спектром нейтронов и газовым теплоносителем / В.Г. Артемов, А.С. Иванов, П.А. Михеев, **Н.С. Нерсесян** // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. – 2020. – Вып. №1 (19). – С. 29-39.
14. Моделирование экспериментов по определению эффективности органов регулирования на критическом стенде с быстрым спектром нейтронов / В.Г. Артемов, Л.М. Артемова, Р.Э. Зинатуллин, А.С. Карпов, **Н.С. Нерсесян** // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. – 2020. – Вып. №2 (20). – С. 27-40.
15. Подготовка и верификация модели для расчета нейтронно-физических характеристик активных зон реакторов с быстрым спектром нейтронов и газовым теплоносителем / В.Г. Артемов, А.С. Иванов, П.А. Михеев, **Н.С. Нерсесян** // Годовой отчет 2019 год / ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»; гл. ред. В.А. Василенко. – Сосновый Бор, 2020. – С. 79-86.
16. РОСФОНД - российская национальная библиотека оцененных нейтронных данных / С.В. Забродская, А.В. Игнатюк, В.Н. Кощеев, М.Н. Николаев // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы. – 2007. – Вып. 1-2. – С. 3-21.
17. Энциклопедия нейтронных данных РОСФОНД (Российская библиотека файлов оцененных нейтронных данных). Полный пакет обоснований отбора оценок / АО «ГНЦ РФ-ФЭИ». – Обнинск, 2006. – URL: <http://www.ippe.ru/podr/abbn/libr/libr.php>, свободный. – (дата обращения 20.08.2020).
18. Групповые константы для расчета реакторов и защиты: справочник / Л.П. Абагян, Н.О. Базазянц, М.Н. Николаев, А.М. Цибуля; под ред. М.Н. Николаева. – М.: Энергоиздат, 1981. – 232 с.
19. *Казанский Ю.А.* Экспериментальные методы физики реакторов: учебное пособие для вузов / Ю.А. Казанский, Е.С. Матусевич. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 272 с.
20. К учету пространственных эффектов при измерении реактивности методом обращенного решения уравнения кинетики / Ю.А. Казанский, И.П. Матвеевко, П.Л. Тютюнников, А.Г. Шокодько // Атомная энергия. – 1981. – Т. 51. – Вып. 6. – С. 387 - 389.
21. *Цыганов С.В.* Измерения эффективности органов регулирования ВВЭР / С.В. Цыганов, Л.К. Шишков // Атомная энергия. – 2004. – Т. 96. – Вып. 3.
22. *Пинегин А.А.* Экспериментальные погрешности и возможность их компенсации при определении эффективности аварийной защиты и дифференциальной эффективности группы ОР СУЗ в реакторе ВВЭР-1000 / А.А. Пинегин, Б.Е. Шумский // ВАНТ, Серия Физика ядерных реакторов. – 2007. – Вып. 1. – С. 76-89.
23. Исследование влияния точности расчета параметров запаздывающих нейтронов на результаты моделирования экспериментов по определению эффективности аварийной защиты ВВЭР / В.Г. Артемов, В.И. Гусев, Р.Э. Зинатуллин, А.С. Карпов, К.Ю. Куракин, А.А. Соловьев, А.Ю. Беляков // Материалы 5-ой международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности ВВЭР», (29 мая – 1 июня) / ОКБ «Гидропресс». – Подольск, 2007. – URL: <http://www.gru/files/proceedings/mntk2007/disc/documents/f76.pdf>, свободный. – (дата обращения 20.08.2020).
24. *Гагаринский А.Ю.* О влиянии неопределенности ядерных данных на результаты обработки кинетических измерений в реакторах с ^{235}U на тепловых нейтронах / А.Ю. Гагаринский, Л.С. Цыганков // ВАНТ, Серия Физика и техника ядерных реакторов. – 1984. – Вып. 9 (46), – С. 65-69.

25. *Кипин Дж.Р.* Физические основы кинетики ядерных реакторов. – М.: Атомиздат. – 1967.
26. Подготовка и обоснование параметров запаздывающих нейтронов в комплексе программ САПФИР/КОРСАР / В.Г. Артемов, Р.Э. Зинатуллин, А.С. Карпов А.В. Пискарев, Ю.П. Шемаев // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. – 2016. – Вып. №1 (3). – С. 38-54.

Аспирант _____ **Нерсесян Нарек Саакович**
(подпись)