

Акционерное общество  
«Государственный научный центр Российской Федерации –  
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»

*На правах рукописи*



**Мишин Вячеслав Александрович**

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС  
ДЛЯ РАСЧЕТНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ,  
ВЫПОЛНЕННЫХ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
БЫСТРЫХ РЕАКТОРАХ**

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

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

Обнинск – 2024

Работа выполнена в Акционерном обществе «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), г. Обнинск.

Научный руководитель: **Перегудов Антон Александрович**

кандидат технических наук,  
начальник департамента  
АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск

Официальные оппоненты:

**Семенов Владимир Николаевич**  
доктор физико-математических наук,  
заместитель заведующего отделения  
ИБРАЭ РАН, г. Москва

**Увакин Максим Александрович**

кандидат физико-математических наук,  
заместитель начальника отдела, начальник  
группы АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»,  
г. Подольск

Ведущая организация:

Акционерное общество «Государственный  
научный центр – Научно-исследовательский  
институт атомных реакторов»,  
г. Димитровград

Защита состоится «12» февраля 2025 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 75.1.077.01 на базе АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», по адресу: 249033, г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» и на сайте <https://www.ippe.ru>

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета 75.1.077.01  
доктор технических наук



А.В. Морозов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

В настоящее время реакторы на быстрых нейтронах активно развиваются. В 2016 году введен в промышленную эксплуатацию реактор БН-800, в 2027 году планируется начало строительства проектируемого реактора БН-1200М. В активной зоне БН-600 проводятся исследования по облучению сборок с новым видом топлива и конструкционных материалов. В связи с этим, задача оперативного сопровождения быстрых реакторов с надежными расчетными кодами высокой точности выходит на новый уровень. Для этого необходимо иметь вычислительный комплекс нового поколения, который бы учитывал достоинства и недостатки существующих кодов сопровождения и позволял удовлетворять актуальные потребности реакторов типа БН.

Как показывает опыт последних лет, все чаще возникают уникальные, никогда ранее не встречавшиеся, расчетные ситуации, связанные с развитием технологий быстрых натриевых реакторов. Реактор БН-600 достаточно активно используется в качестве инструмента для постановки реакторных экспериментов по отработке новых видов топлива и конструкционных материалов. Ведутся исследования по обоснованию постановки в действующие реакторы БН облучательных устройств для наработки изотопов (в частности  $^{60}\text{Co}$ ). Для реактора БН-800 действует программа перевода на полную загрузку МОКС-топливом (в настоящее время идет работа по переходу на загрузку с энергетическим плутонием). Все это сопряжено с возникновением специфических расчетных ситуаций. Совершенно новая ситуация возникнет и при вводе в строй проектируемого сейчас реактора БН-1200М, конструкция активной зоны и ее элементов в котором существенно отличаются от реакторов БН-600 и БН-800. Поэтому актуальной задачей является создание кода расчетного сопровождения нового поколения, мощного и универсального в смысле решаемых задач, точности расчета, максимального использования существующих вычислительных возможностей, обладающего удобным и современным пользовательским интерфейсом. Такой код может использоваться в качестве независимого расчетного инструмента повышенной точности для подтверждения и, при необходимости, корректировки результатов оперативного сопровождения, получаемых на станции, а также для анализа нестандартных расчетных ситуаций повышенной сложности.

### Степень разработанности темы

При написании диссертационной работы были изучены работы, связанные с созданием программ или вычислительных комплексов, позволяющих моделировать активные зоны быстрых реакторов. Были рассмотрены следующие программы: KAP, SHiPR, ГЕФЕСТ/ГЕФЕСТ800, ModExSys. Опираясь на поло-

жительный опыт использования отечественных программных комплексов, был разработан новый вычислительный комплекс BNcode, который учитывает достоинства и недостатки существующих вычислительных комплексов и позволяет удовлетворить актуальные потребности научного сопровождения реакторов БН-600 и БН-800, а в перспективе и БН-1200М.

## **Цели и задачи работы**

Цель работы состоит в разработке, аттестации и внедрении вычислительного комплекса для расчетного сопровождения измерений, выполненных на действующем реакторе БН-800. В перспективе разработанный комплекс будет использоваться для сопровождения реактора БН-600 и проектируемого реактора БН-1200М. Разработанный вычислительный комплекс позволит:

1) сделать вывод о точности расчетного прогнозирования нейтронно-физических характеристик активной зоны при эксплуатации реактора БН-800 в переходный период и с полной загрузкой МОКС-топливом;

2) расширить область применения и завершить процедуру верификации проектных программ TRIGEX, JARFR, MMKKENO и MMKC для реактора БН-800 с МОКС-топливом;

3) сохранить и структурировать уникальную экспериментальную информацию по активной зоне, полученную при эксплуатации реактора БН-800;

4) проводить независимый расчетный контроль повышенной точности для обоснования безопасности активной зоны в процессе эксплуатации реактора БН-800.

Достижение цели работы будет способствовать повышению точности расчетного прогнозирования нейтронно-физических характеристик и безопасности работы действующих реакторов БН.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие научно-технические **задачи**:

1) создание универсальной, гибкой вычислительной платформы для оперативной обработки, хранения, расчетного анализа данных нейтронно-физических реакторных экспериментов, позволяющей интегрировать в себя современные нейтронно-физические и теплогидравлические программы;

2) осуществление сбора и анализа информации о выполненных измерениях в реакторе БН-800: структурирование информации, анализ ее достаточности, отбор достоверной информации, заполнение базы данных;

3) создание математических моделей различных состояний активной зоны реактора БН-800;

4) проведение расчетного анализа измерений, выполненных на реакторе БН-800 с использованием набора программ для ЭВМ, интегрированных в разработанную платформу;

5) проведение оценки полной методической составляющей погрешности нейтронно-физических характеристик для проектных программ JARFR и TRIGEX при переходе на полную загрузку МОКС-топливом;

6) осуществление авторского сопровождения эксплуатации энергоблока № 4 Белоярской АЭС в части работ научного руководителя, а именно: рассмотрение и согласование эксплуатационной и проектной документации на тепловыделяющие сборки (далее ТВС) и активную зону; согласование объема перегрузок топлива перед началом каждой микрокампании с проведением подтверждающих расчетов.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

В рамках данной работы был разработан вычислительный комплекс расчетного сопровождения ректора БН-800. Созданы математические модели для различных состояний активной зоны реактора БН-800. Проведен расчетный анализ и выполнена оценка точности определения характеристик активной зоны БН-800 в переходный период и с полной загрузкой МОКС-топливом.

Таким образом, отраженные в диссертации положения соответствуют пункту № 1 паспорта специальности 2.4.9 «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность», а именно «моделирование нейтронно-физических, химических, тепловых, гидравлических и механических процессов, создание программных комплексов, обеспечивающих достоверное расчетное обоснование объектов ядерной техники и их безопасное функционирование при эксплуатации, а также снятии с эксплуатации».

### **Научная новизна работы**

Впервые создан инструмент, позволяющий организации научного руководителя проводить независимые от эксплуатирующей организации высокоточные прогнозные расчеты нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора БН-800 с МОКС-топливом для обоснования его безопасности при эксплуатации на мощности, при проведении измерений в процессе перегрузки топлива, при постановке экспериментальных ТВС, когда возникает необходимость рассмотрения нестандартных расчетных ситуаций повышенной сложности.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

- Созданный расчетно-вычислительный комплекс внедрен в подразделения АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» для сопровождения реактора БН-800. С его помощью проводился независимый контроль ядерной безопасности при переходе активной зоны реактора БН-800 на МОКС-топливо. Универсальность подхода позволяет применять данный комплекс не только для перспективных установок на быстрых

нейтронах МБИР и БН-1200М, но и для быстрых реакторов со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями БРЕСТ и СВБР соответственно.

- С помощью разработанной гибкой оболочки комплекса были созданы бенчмарк-модели реальных состояний активной зоны, с применением которых удалось завершить верификацию программ TRIGEX, JARFR, ММККЕНО и ММКС для реактора БН-800 с МОКС-топливом и перейти к процедуре их аттестации в Ростехнадзоре. Используя данные модели, можно верифицировать и аттестовать в Ростехнадзоре нейтронно-физические программы и библиотеки реакторных констант, применяемые для обоснования безопасности реакторной установки (далее РУ) и атомной электростанции (далее АЭС) с реакторами на быстрых нейтронах.

- Использование максимально точных методов расчетного моделирования при анализе измеренных данных в реакторе БН-800 позволили снизить погрешности прогнозирования нейтронно-физических характеристик его активной зоны, особенно при переходе на полную загрузку МОКС-топливом.

- Полученные данные обладают большой ценностью для лицензирования реактора БН-800 с активной зоной с энергетическим плутонием, а также перспективного коммерческого реактора БН-1200М.

## **Методология и методы исследования**

Для осуществления расчетного сопровождения активной зоны реактора БН-800 были разработаны и приняты следующие методы:

- 1) расчет изменения состава активной зоны в процессе ее эксплуатации осуществляется с использованием многогруппового расчета на основе диффузионного приближения в связке с программой по расчету изотопной кинетики (TRIGEX; CARE);

- 2) расчет величины критичности, эффективности стержней СУЗ, а также эффектов реактивности осуществляется с использованием метода Монте-Карло (ММКК; ММКС);

- 3) работа реактора на мощности рассчитывается с использованием связанного расчета диффузионной программы и программы расчета теплогидравлики (TRIGEX; MIF-2);

- 4) с использованием программ, основанных на методе Монте-Карло, были определены методические поправки, которые рекомендуется добавлять к результатам расчета нейтронно-физических характеристик, полученных по диффузионным программам, таким как: ГЕФЕСТ800, JARFR, FACT-BR и др.;

- 5) для проведения верификации разработанных методов, реализованных в вычислительном комплексе BNcode, были использованы данные измерений, проведенных на реакторе БН-800 в период перехода на полную загрузку МОКС-топливом.

Таким образом, методология и методы исследования в данной диссертации позволяют обеспечить надежность и точность результатов, получаемых при расчете нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик активной зоны реактора БН-800.

### **Положения, выносимые на защиту**

- Вычислительный комплекс BNcode для расчетного сопровождения БН-800 и анализа проводимых на нем измерений.
- Математические модели для различных состояний активной зоны реактора БН-800.
- Бенчмарк-модели переходных состояний загрузки МОКС-топливом для верификации проектных программ и программ нового поколения.
- Результаты расчетного анализа и оценка точности определения характеристик активной зоны БН-800 в переходный период и с полной загрузкой МОКС-топливом.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Результаты нейтронно-физических расчетов получены с помощью аттестованных Ростехнадзором программ TRIGEX, ММКК, ММКС, MIF-2, CARE, CONSYST, интегрированных в BNcode, с использованием систем констант БНАБ-93, БНАБ-РФ и РОСФОНД.

Материалы, представленные в диссертации, были доложены на пяти международных и восьми межведомственных мероприятиях:

1. Научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-2019)» (с 27 по 29 ноября 2019 г., Обнинск, Россия).
2. Международная научно-практическая конференция молодых специалистов, ученых и аспирантов (Волга-2022) (с 5 по 9 сентября 2022 г., БО НИЯУ МИФИ «Волга», Тверская обл., Россия).
3. Научно-техническая конференция молодых специалистов Государственной корпорации «Росатом» (ноябрь 2020 г., Москва, Россия).
4. VI международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ-2021) (октябрь 2021 г., Москва, Россия).
5. X Всероссийская молодежная конференция «Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения» (с 17 по 18 марта 2021 г., Дмитровград, Россия).
6. Конференции «Ядерные технологии: от исследования к внедрению – 2022» (15 апреля 2022 г., Нижний Новгород, Россия).

7. XXII Международная конференция молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам (с 13 по 14 апреля 2022 г., Подольск, Россия);
8. Международная конференция МАГАТЭ FR-22 по быстрым реакторам (с 19 по 22 апреля 2022 г., Вена, Австрия).
9. Научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-2022)» (с 31 мая по 3 июня 2022 г., Обнинск, Россия).
10. XXII Школа молодых ученых ИБРАЭ РАН (с 23 по 24 мая 2023 г., Москва, Россия).
11. Отраслевая научно-техническая конференция, посвященная 50-летию пуска БН-350 «Развитие технологии реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БН-2023)» (с 3 по 6 октября 2023 г., Нижний Новгород, Россия).
12. XVI Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров» (24 мая 2023 г., Обнинск, Россия).
13. Очное заседание производственно-технологического клуба «Цифровые сезоны. Цифровой двойник объекта» (19–20 сентября 2023 г., Томск, Россия).

### **Личный вклад автора**

- Разработаны программные модули вычислительного комплекса VNcode для обработки, хранения, расчетного анализа данных нейтронно-физических измерений, выполненных на энергетическом реакторе БН-800.
- Осуществлен сбор и анализ информации о выполненных измерениях на реакторе БН-800 – структурирование информации, анализ ее достаточности, отбор достоверной информации, заполнение баз данных.
- Проведен расчетный анализ выполненных измерений на реакторе БН-800.
- Определены для инженерных программ методические поправки нейтронно-физических характеристик в переходный период и при полной загрузке МОКС-топлива в БН-800.
- Разработаны серии бенчмарк-моделей выполненных измерений в реакторе БН-800 с целью верификации проектных и разрабатываемых кодов нового поколения.
- Согласован объем перегрузок топлива РУ БН-800 перед началом каждой микрокампании с проведением подтверждающих расчетов эксплуатации активной зоны в предстоящей микрокампании с подтверждением соблюдения пределов и условий безопасной эксплуатации.
- Даны рекомендации по использованию методических поправок в программах JARFR и ГЕФЕСТ800 для расчета основных нейтронно-физических характеристик реактора БН-800.

## Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 5 печатных изданиях: 5 публикаций в журналах, входящих в перечень ВАК.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации 124 страницы, в том числе 48 рисунков и 18 таблиц. Список литературы содержит 47 наименований.

**Во введении** рассмотрены широко известные расчетные коды, применяемые в современной практике для расчетного сопровождения ядерных реакторов на быстрых нейтронах. Показана необходимость в создании нового расчетного комплекса BNcode для научного сопровождения действующих реакторов БН, включающего в себя наиболее совершенные на данный момент методы математического моделирования и реализующие их компьютерные коды.

Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и решаемые задачи, научная новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена описанию создания расчетного комплекса BNcode. В главе показано, из каких программных модулей состоит комплекс, на базе чего основан, какие были написаны программы-связки для интеграции различных расчетных кодов в BNcode. Описан интерфейс входных и выходных данных, приведены примеры работы комплекса.

BNcode – это современный расчетно-вычислительный комплекс, созданный для сопровождения действующих реакторов БН, представляющий интегрированную платформу с развитыми возможностями расчетного моделирования, современным интерфейсом, позволяющим менять расчетные модули и проводить адаптацию входных и выходных данных.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема работы BNcode, который состоит из трех основных блоков:

- 1) база данных (БД800) – топливный архив, в котором содержится информация по всем состояниям жизненного цикла активной зоны БН-800;
- 2) вычислительный блок – проведение расчетного анализа экспериментальных данных и расчетов по планированию предстоящих микрокампаний;
- 3) блок интерфейсных модулей и генерации расчетных моделей.

База данных (БД800) состоит из следующих компонентов:

- база данных состояний активной зоны и ее элементов;
- база данных расчетных моделей активной зоны для различных состояний и модификаций;

- база данных результатов измерений нейтронно-физических характеристик РУ;
- база данных расчетных значений нейтронно-физических характеристик.

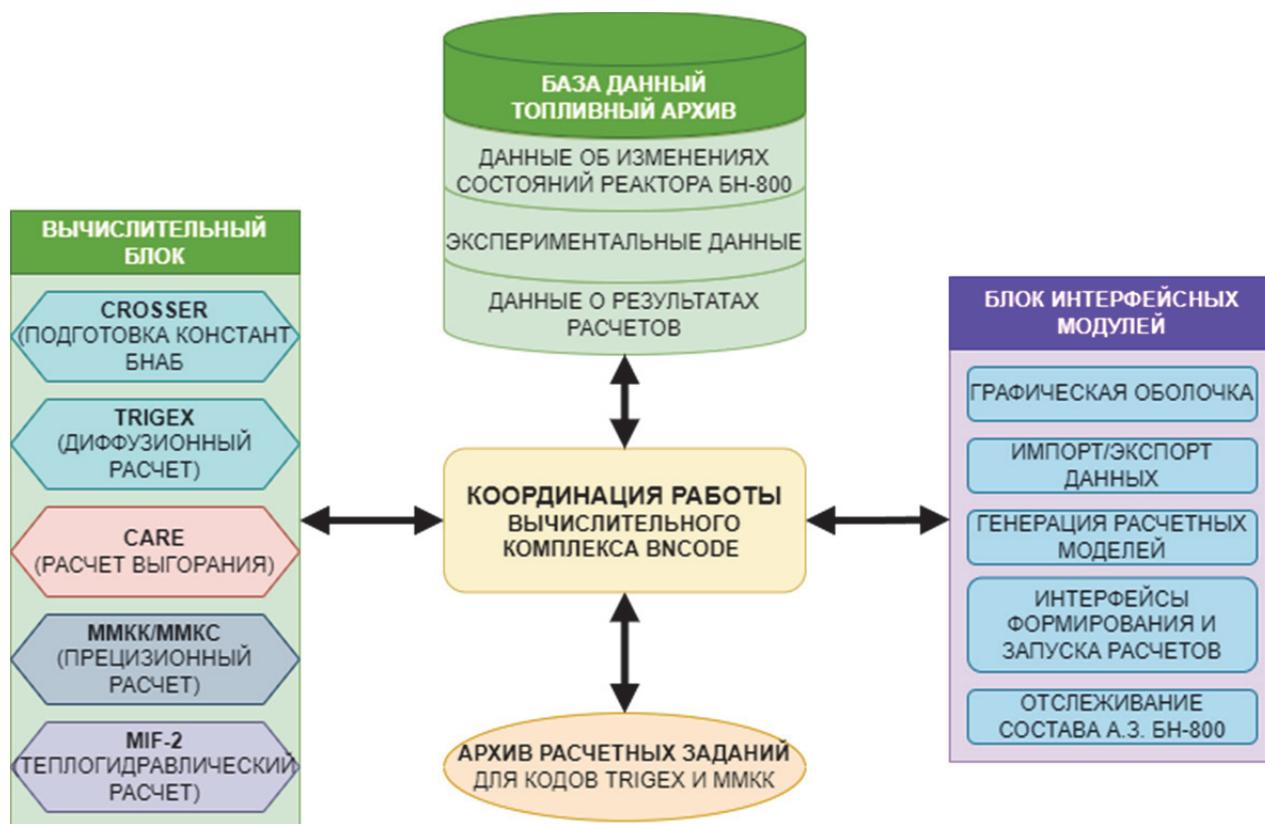


Рисунок 1 – Принципиальная схема BNcode

В вычислительный блок включены следующие расчетные коды:

- TRIGEX – диффузионный код расчета нейтронно-физических характеристик;
- ММКК/ММКС – прецизионные нейтронно-физические коды (групповая и детальная версии, соответственно), реализующие метод Монте-Карло;
- ПТК – программа для учета Доплер-эффекта в расчетах с поточечным слежением за энергией нейтрона;
- MIF-2 – программа для расчета теплогидравлических характеристик активной зоны;
- CROSSER – программа подготовки констант. CROSSER является оптимизированной с точки зрения быстродействия версией программы CONSYST;
- БНАБ-93 – система констант для мультигрупповых расчетов быстрых реакторов и защиты.

Одним из наиболее важных блоков платформы BNcode является блок интерфейсных модулей и генерации расчетных моделей. В нем происходит авто-

математическая генерация расчетных моделей и осуществляется вся логика управления процессами и запросами пользователя. В этом блоке реализовано:

- обработка, хранение и анализ данных нейтронно-физических экспериментов, выполненных на энергетических реакторах;
- расчетное формирование топливных загрузок реакторных установок на момент проведения экспериментов с учетом ее эксплуатационной истории и выгорания топлива, анализ и хранение условий проведения экспериментов;
- автоматизированное построение согласованных расчетных моделей на диффузионный код и код метода Монте-Карло;
- хранение и анализ результатов расчетов по указанным моделям;
- постановка экспериментальных ТВС в активную зону реактора с уникальными размерами и материалами;
- автоматическое движение органов СУЗ по расчетной модели активной зоны реактора;
- визуализация результатов расчета;
- управление и обмен данными между расчетными кодами;
- автоматическая организация расчетов на супер-ЭВМ.

**Вторая глава** посвящена описанию математических моделей, которые используются в BNcode для моделирования активной зоны реактора БН-800. Показана схема проведения вычислений по отслеживанию состава активной зоны в процессе выгорания и формированию БД800. Описан процесс создания бенчмарк-моделей, описывающих переход активной зоны реактора БН-800 на полную загрузку МОКС-топливом. Представлена оценка методической составляющей погрешности основных проектных характеристик активной зоны с МОКС-топливом.

В вычислительном комплексе BNcode разработана базовая модель активной зоны реактора БН-800, так называемый «скелет» расчетной модели. Радиальный и аксиальный ее вид показан на рисунках 2 и 3 соответственно. Каждая ТВС или сборка в этой модели описывается уникально – отдельным расчетным типом пакета. В аксиальном направлении каждый пакет разбит на ряд уникальных физических зон, в радиальном – представляет шестигранную призму гомогенного состава. Базовая расчетная модель включает: 1234 пакета; 30850 физических зон; 25 расчетных слоев; 39 изотопов.

В настоящее время BNcode используется в качестве системы контроля за эксплуатацией БН-800 в подразделениях АО «ГНЦ РФ – ФЭИ». Одновременно ведется работа по расширению функционала BNcode на реактор БН-600.

На данный момент с помощью BNcode было просчитано порядка 110 состояний реактора БН-800 (с 1-й по 11-ю микрокампании), сформирована БД800 – база данных загрузок реактора. Специальный модуль выгорания в BNcode позволяет отслеживать составы активной зоны реактора в процессе ее эксплуатации.

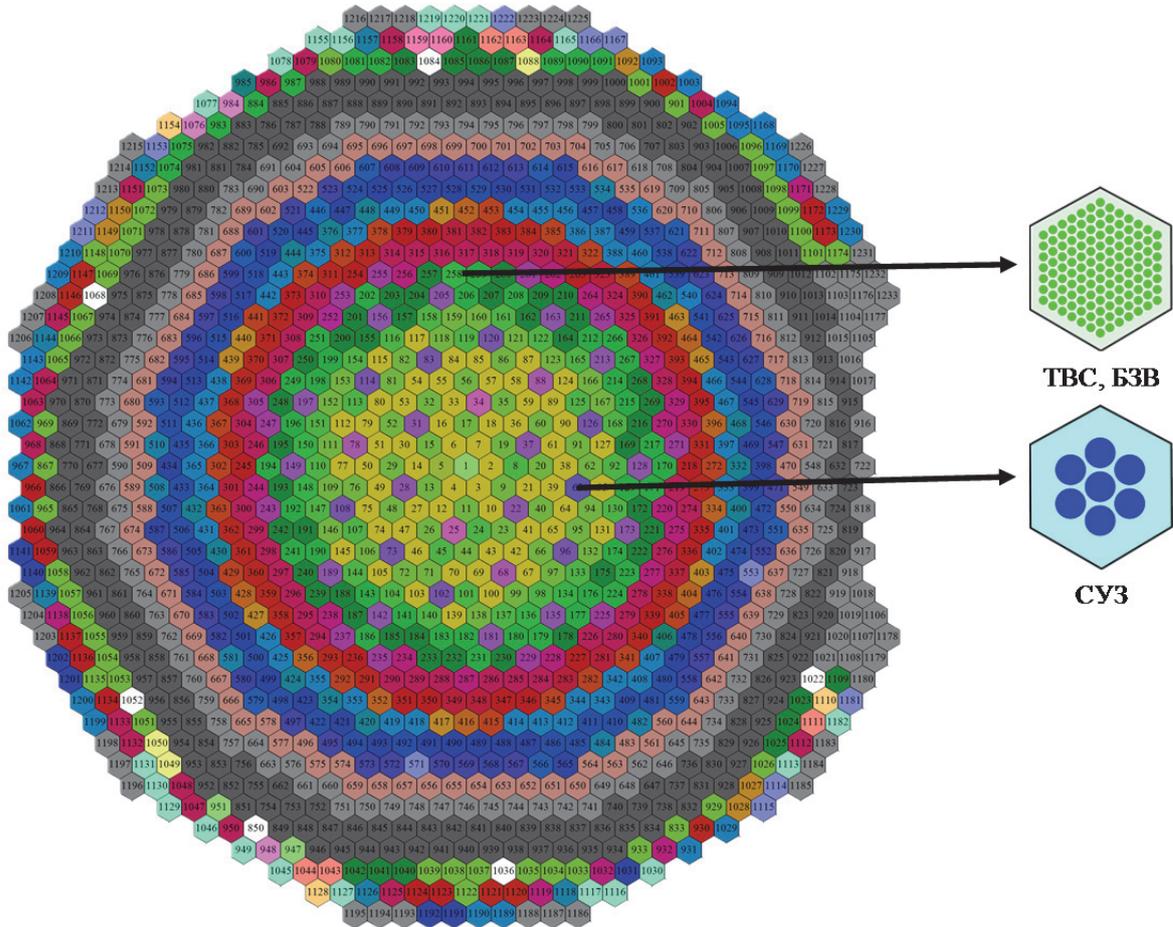


Рисунок 2 – Базовая расчетная модель реактора БН-800 (радиальный вид)

№ Слой	Высоты, см		Тип сборки					
	Холодное состояние	Горячее состояние	UO <sub>2</sub>	СТТ	СВУТ	БЗВ	СБЭ	ССЗ
25	5.256	5.263						
24	5.256	5.263						
23	4.502	4.514						
22	6.972	6.990						
21	6.972	6.990						
20	6.972	6.990						
19	6.972	6.990						
18	7.221	7.240						
17	8.200	8.300						
16	8.200	8.300						
15	8.200	8.300						
14	8.200	8.300						
13	8.200	8.300						
12	8.200	8.300						
11	8.200	8.300						
10	8.200	8.300						
9	8.200	8.300						
8	8.200	8.300						
7	8.200	8.300						
6	8.024	8.045						
5	8.024	8.045						
4	8.024	8.045						
3	8.024	8.045						
2	3.002	3.010						
1	3.501	3.510						

- Активная зона
- Торцевой экран
- Зона воспроизводства
- ВС4
- Стальная конструкция
- Натриева полость

Рисунок 3 – Размеры и высотная разбивка базовой модели

Время расчета в рамках одной микрокампании составляет:

- одного временного шага ~ 6 минут;
- одного состояния по ММКК/ММКС ~ 20/60 минут (расчеты проводились на супер-ЭВМ);
- одной микрокампании ~ 6 часов;
- цикл из 11 микрокампаний ~ 3 суток.

Объем сформированной базы данных составил ~ 500 Гб.

Полная загрузка МОКС-топливом активной зоны реактора БН-800 является первым опытом масштабного использования плутония в отечественных энергетических быстрых реакторах. Поэтому необходимо дополнительное обоснование точности расчета характеристик РУ БН-800 при переходе на загрузку МОКС-топливом с использованием верифицированных и аттестованных кодов.

Все российские коды верифицированы под МОКС-топливо на моделях нулевой мощности с вставками из этого топлива. Критичность этих моделей определялась не вставками МОКС-топлива, а урановыми драйверными зонами, и доля запаздывающих нейтронов в этих моделях соответствовала урановому топливу. Возможность полномасштабного моделирования активной зоны БН-800 на МОКС-топливе появилась только в настоящее время после модернизации экспериментальных стендов БФС в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» и их оснащения для полномасштабного моделирования.

Важной задачей стало создание бенчмарк-моделей БН-800, описывающих его переход с гибридной активной зоны (8 МК) на полную загрузку МОКС-топливом (11 МК).

Выполнение этой работы позволило верифицировать и, при необходимости, уточнить коды и константы на полномасштабной модели реактора, смоделировать переходный период с уранового на МОКС-топливо.

Бенчмарк включает в себя описание активной зоны для четырех микрокампаний:

- 1) 8-я МК – активная зона с минимальным числом ТВС с МОКС-топливом;
- 2) 9-я МК – активная зона с 1/3 ТВС с МОКС-топливом;
- 3) 10-я МК – активная зона с 2/3 ТВС с МОКС-топливом;
- 4) 11-я МК – активная зона с полной загрузкой МОКС-топливом.

Бенчмарк-модели разработаны на базе полных моделей для этих микрокампаний в рамках расчетного комплекса BNcode из архива топливных сборок реактора, в котором содержится информация по всем состояниям жизненного цикла реактора БН-800.

Бенчмарк-модели сформированы следующим образом:

- ТВС ЗМО, ЗСО и ЗБО объединены в группы по обогащению и по типу топлива;
- размеры ТВС приняты для «холодного» состояния, состав ТВС – гомогенный по шестигранной призме;

- шаг расположения гексагональной ячейки в плоскости – 10,04 см;
- высота активной зоны – 90,2 см (и для уранового, и МОКС-топлива);
- температура для модели принята 513 К;
- стержни СУЗ выставлены в критическое положение на начало каждой из микрокампаний. Для этого основная расчетная сетка немного изменяется.

На основе разработанных бенчмарков была оценена методическая составляющая погрешности для инженерных кодов при переходе на полную загрузку МОКС-топливом, которая состоит из нескольких составляющих:

- во-первых, с приближениями, принятыми в программе при реализации решения уравнения переноса нейтронов (поправка на диффузионное приближение);
- во-вторых, с неточностью 26-группового представления сечений;
- в-третьих, с приближениями, принятыми при построении трехмерной расчетной модели активной зоны реактора: гетерогенная структура ТВС и СУЗ, использование средних значений концентраций и температур и другие параметры.

Методическая составляющая погрешности рассчитывается по результату сравнения расчетов, выполненных по инженерным (в данной работе это TRIGEX) и прецизионным кодам (в данной работе это ММКК).

По коду TRIGEX расчеты проводились в 26-групповом энергетическом приближении с двумя методическими опциями – одной и шестью точками на кассету.

Расчеты по ММКК проводились для гомогенных и гетерогенных моделей (гетерогенно были выделены ТВС, СУЗ и ПАЗ) в мультигрупповом (299 групп) и подгрупповом приближении (988 групп). Подгруппы были выделены для изотопов U-238, U-235, Pu-239. Статистическая погрешность в расчете по программе ММКК составила  $3 \cdot 10^{-5}$ .

Результаты расчета методических поправок представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета методических поправок

Номер МК	Программа				
	TRIGEX		ММКК		
	Энергетические группы				
	26	26	299	299	988
	Метод/опция				
	6 точек	1 точка	транспортная поправка	гетерогенная поправка	поправка 299-гр. расчета
8	0,9821	+1,2 %	+0,7%	+0,7%	+0,2%
9	0,9816	+1,3 %	+0,7%	+0,8%	+0,2%
10	0,9801	+1,3 %	+0,7%	+0,8%	+0,2%
11	0,9814	+1,4 %	+0,7%	+0,9%	+0,2%

Исходя из результатов, приведенных в таблице 1, можно сделать следующие выводы:

- транспортная поправка диффузионного расчета составляет  $\sim + 0,7 \%$ ;
- гетерогенная поправка составляет  $\sim + 0,9 \%$  (для полной загрузки МОКС-топливом);
- поправка 299-группового расчета составляет  $\sim + 0,2 \%$ ;
- полная методическая поправка диффузионного расчета тестовых моделей БН-800 составляет  $\sim + 1,8 \%$  (для полной загрузки МОКС-топливом).

Важно отметить, что расчет по программе TRIGEX с одной точкой на кассету уменьшает величину методической поправки до  $0,4 \%$ .

В диссертационной работе представлены расчеты методических поправок к инженерным кодам для эффективности стержней СУЗ, поля энерговыделения и изменения реактивности по кампании реактора.

**В третьей главе** приводятся результаты расчетного анализа измерений, выполненных на реакторе БН-800 с 1 по 11 микрокампанию. Сделаны выводы о точности расчетного предсказания нейтронно-физических характеристик активной зоны.

На рисунке 4 представлены результаты расчета эффективного коэффициента размножения в критических состояниях реактора БН-800 на минимально-контролируемом уровне мощности на начало 1–11 микрокампаний, рассчитанные с помощью JARFR и ММКК с использованием, как в том, так и в другом случае, библиотеки констант БНАБ-93.

Расчеты с помощью ММКК проводились для гетерогенных моделей (гетерогенно были выделены ТВС, стержни СУЗ и ПАЗ) в подгрупповом приближении (988 групп), подгруппы были выделены для изотопов U-238, U-235, Pu-239 и Fe. Статистическая погрешность в этом расчете составила  $3 \cdot 10^{-5}$ .

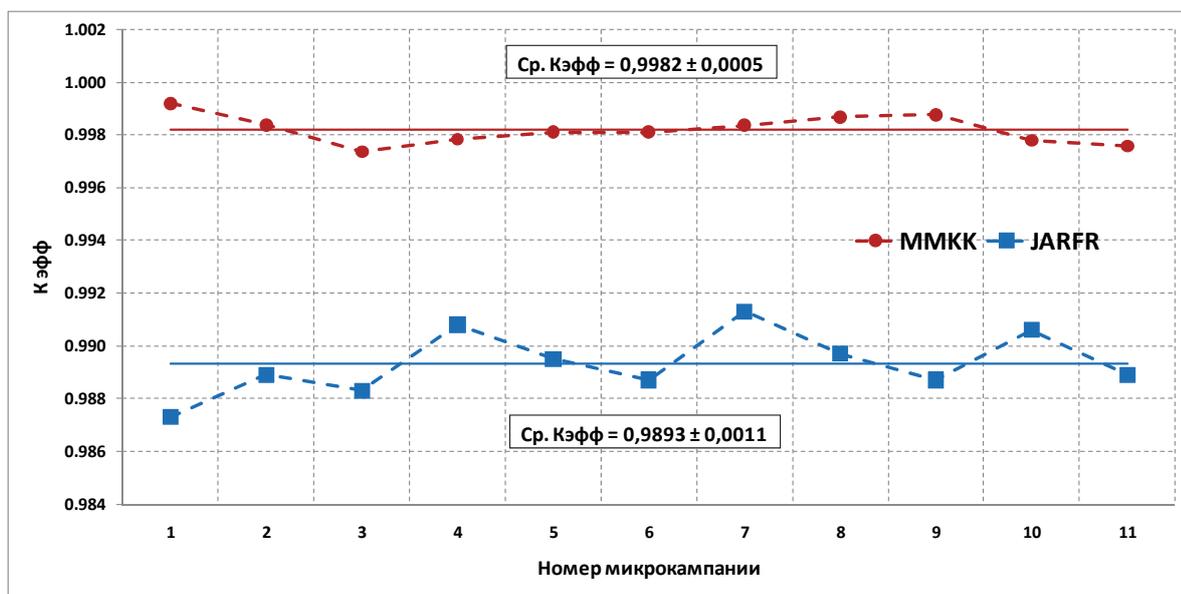


Рисунок 4 – Результаты расчета критичности по программам JARFR и ММКК

Анализируя результаты расчета эффективного коэффициента размножения, полученные с помощью JARFR и ММКК, можно сделать следующие выводы:

1) стоит отметить стабильность использования библиотеки групповых констант БНАБ-93 при переходе активной зоны на полную загрузку МОКС-топливом;

2) темп потери реактивности за микрокампанию рассчитывается с точностью не хуже  $0,1 \% \Delta k/k$ ;

3) расчет критических состояний реактора в обоих расчетах предсказывается с хорошей точностью – максимальный разброс не превышает  $\pm 0,1 \%$ ;

4) наблюдалось закономерное смещение результата расчета по диффузионному коду от результата по коду метода Монте-Карло, которое составило –  $0,8 \%$ .

Первый опыт масштабного использования плутония в отечественных энергетических быстрых реакторах и предстоящий переход активной зоны на загрузку высокофоновым плутонием требует использовать максимально точные методы расчетного моделирования (как констант, так и геометрии) при прогнозах будущих микрокампаний активной зоны. Поэтому были проведены дополнительные расчеты критических состояний активной зоны с помощью прецизионной версии программы ММКС с использованием файлов оцененных нейронных данных РОСФОНД2010 (RF10) и ее более новой версии РОСФОНД\_2020.2 (RF\_CE). Статистическая погрешность в расчетах составила  $8 \cdot 10^{-5}$ .

Среднее значение расчета величины критичности при моделировании активной зоны с урановым топливом с 1-й по 8-ю микрокампанию составляет  $1,0010 \pm 0,0004$  как с использованием файлов оцененных нейронных данных RF10, так и RF\_CE. Поэтому на рисунке 5 представлены результаты для микрокампаний, в которых осуществлялся переход на МОКС-топливо.

На основе анализа результатов, представленных на рисунке 5, сделаны следующие выводы:

1) использование более современной версии библиотеки констант позволяет увеличить расчетное значение критичности на  $\sim 0,3 \%$ , что в свою очередь снижает расчетно-экспериментальное расхождение до  $\pm 0,1 \%$ ;

2) при переходе на МОКС-топливо наблюдается тенденция к уменьшению величины критичности при использовании библиотеки констант РОСФОНД2010 – значение эффективного коэффициента размножения уменьшается по мере увеличения доли МОКС-топлива. При использовании более современной библиотеки констант РОСФОНД\_2020.2 эта тенденция менее выражена –  $1,000 \pm 0,001$ .

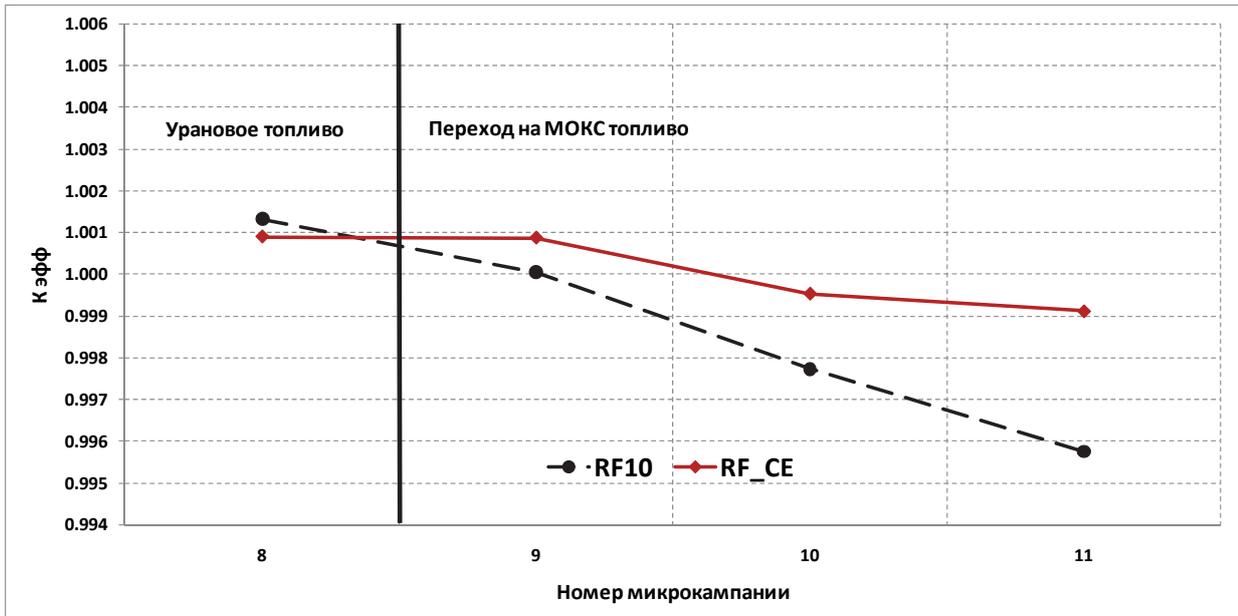


Рисунок 5 – Результаты расчета критичности по программе ММКС

Измерения эффективности органов СУЗ является штатной операцией для реактора БН-800 и проводятся в начале и конце каждой микрокампании. Цель этих измерений – обоснование ядерной безопасности при эксплуатации реакторной установки, включая плановые ремонтные работы и работы по перегрузке топлива.

В рамках этой работы был проведен анализ полного набора измерений эффективности органов СУЗ, выполненных с 1-й по 11-ю микрокампании реактора БН-800: 320 измерений одиночных стержней КС; 240 измерений эффективности одиночных АЗ, ПАЗ; 40 измерений эффективности одиночных РС.

Большой объем полученной информации не позволяет привести все результаты. Поэтому данные по измерениям одиночных стержней СУЗ преимущественно урановой активной зоны были усреднены с 1 по 8 МК. Более пристальное внимание было уделено анализу измерений в микрокампаниях с частичной и полной загрузкой МОКС-топливом.

На рисунках 6–7 представлены усредненные значения по группам стержней СУЗ расчетно-экспериментальных отклонений для всех четырех расчетных кодов. На каждом рисунке выделен коридор  $\pm 15\%$ , который проведен по максимально наблюдаемым расхождениям усредненных значений с экспериментом.

Исходя из результатов расчетов, представленных на рисунках 6–7, можно сделать следующие выводы:

- расчетные результаты для основных групп стержней СУЗ (КС и АЗ) хорошо согласуются как между собой, так и с экспериментальными значениями;
- разброс расчетных результатов для органов АЗ в начале МК несколько больше, чем в конце МК.

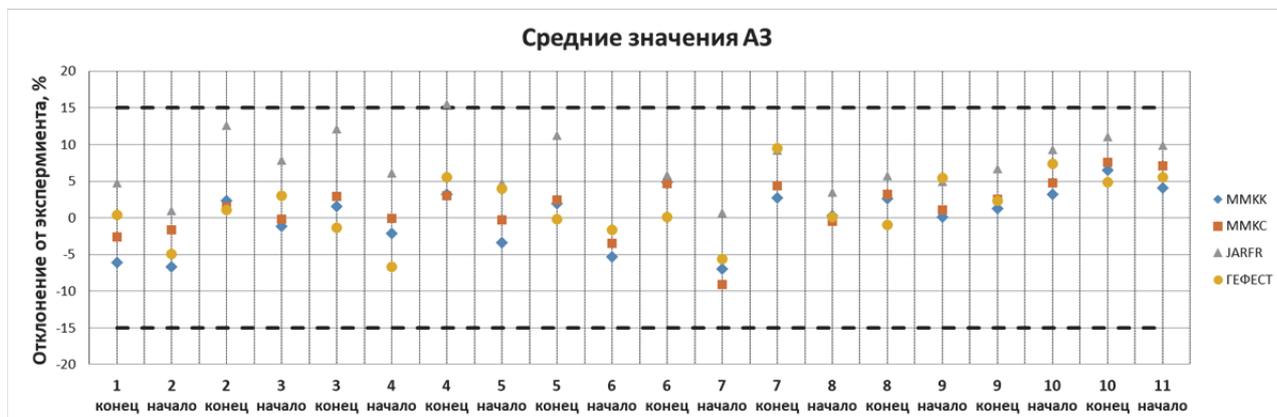


Рисунок 6 – Средние значения отклонений эффективности стержней АЗ

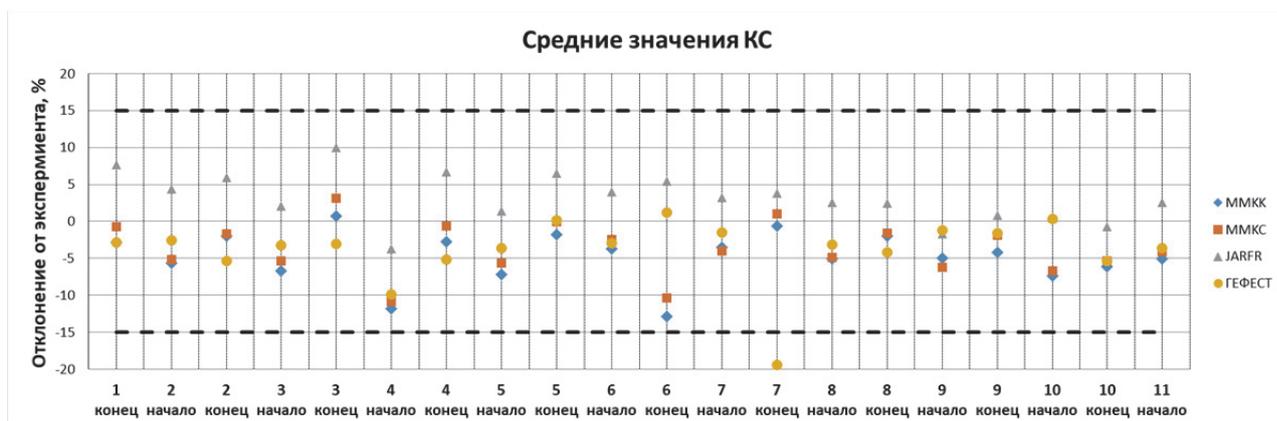


Рисунок 7 – Средние значения отклонений эффективности стержней КС

В результате работы сформирована база данных из 600 расчетных заданий, которая позволила сделать выводы о точности расчетного предсказания измерений эффективности РО СУЗ, проводимых на БН-800.

Также в третьей главе представлен анализ максимального запаса реактивности, баланса реактивности при перегрузке и при взводе стержней АЗ, температурного и мощностного эффектов реактивности.

**В четвертой главе** представлены результаты анализа экспериментов по измерению поля энерговыделения в реакторе БН-800, которые были выполнены в 2022 году.

Для проведения гамма-сканирования были выбраны 27 «свежих» ТВС с МОКС-топливом (13 ТВС ЗМО, 7 ТВС ЗСО, 7 ТВС ЗБО) из числа сборок, установленных в ходе 10-й перегрузки (без продуктов деления на начало предварительного облучения), как показано на рисунке 8. Для снижения погрешности эксперимента периодически проводились повторные измерения активности реперной ТВС.

Выполненные измерения являются важным этапом подтверждения соответствия реальных параметров активной зоны реактора БН-800 с практически полной загрузкой МОКС-топливом ее проектным характеристикам.

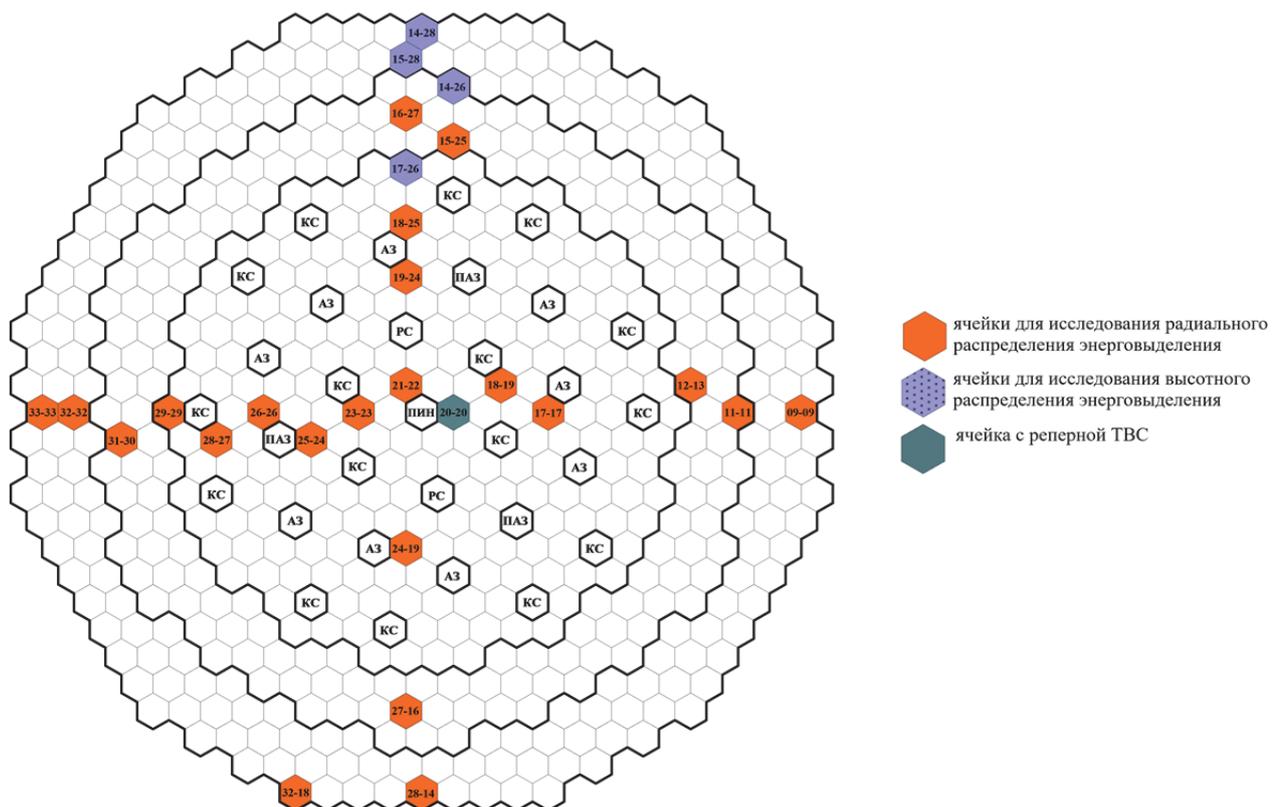


Рисунок 8 – Местоположение ТВС, для которых было выполнено гамма-сканирование

В таблице 2 приведены результаты статистического анализа расхождений в виде оценок среднего смещения и максимальные расхождения между расчетом и экспериментом. Экспериментальная погрешность выходов гамма-квантов составила 4–5 %.

Оценка масштаба модельных погрешностей представляет самостоятельный интерес. В настоящей работе расчетный анализ экспериментов выполнялся тремя группами специалистов: ФЭИ (по программе TRIGEX), БАЭС (по программе ГЕФЕСТ800) и ОКБМ (по программе JARFR), каждая из которых независимо формировала собственные расчетные модели на основе данных сопровождения БН-800.

Таблица 2 – Обобщенный анализ расчетно-экспериментальных расхождений

Направление по активной зоне	TRIGEX		ГЕФЕСТ800		JARFR	
	среднее	макс.	среднее	макс.	среднее	макс.
Запад – восток	$-0,3 \pm 1,2$	2,8	$0,1 \pm 1,9$	3,1	$0,7 \pm 1,5$	2,9
Юг – север	$-1,0 \pm 1,6$	3,7	$-0,9 \pm 1,5$	3,6	$0,7 \pm 1,6$	3,7

Максимальное расхождение относительного энерговыделения в основном массиве ТВС активной зоны не превышает 4 %.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

В рамках диссертационной работы разработан, аттестован и внедрен в опытную эксплуатацию новый вычислительный комплекс для расчетного сопровождения реактора БН-800 – BNcode.

Особенностью BNcode является использование для нейтронно-физических расчетов прецизионных методов моделирования, для расчета полей температур активной зоны при выводе реактора на мощность – теплогидравлического кода.

Все полученные результаты отражены в публикациях, представленных во введении диссертационной работы, и заключаются в следующем:

1) Создан новый вычислительный комплекс BNcode, представляющий интегрированную платформу, которая имеет развитые возможности расчетного моделирования, гибкий, удобный и современный интерфейс, позволяющий с легкостью менять расчетные модули и проводить адаптацию входных и выходных данных. Комплекс зарегистрирован в Реестре программ для ЭВМ Федерального Института промышленной собственности – свидетельство о государственной регистрации BNcode № 2020661744 от 30.09.2020.

2) Сделан вывод о точности расчетного прогнозирования нейтронно-физических характеристик на основе анализа расчетно-экспериментальных расхождений с применением максимально точных методов моделирования. Полученные экспериментально-расчетные расхождения соответствуют современным требованиям к программному обеспечению подобных расчетов.

3) Созданы бенчмарк-модели реальных состояний активной зоны, использование которых позволило завершить верификацию программ TRIGEX, JARFR, ММКК и ММКС применительно к реактору БН-800 с МОКС-топливом и аттестовать их в Ростехнадзоре.

4) Оценены методические поправки, которые рекомендуется использовать при расчете проектных характеристик активной зоны БН-800 с МОКС-топливом с помощью инженерных кодов. При расчете критичности поправка составляет + 1,8 %, эффективности РО СУЗ – 11 %, энерговыделения ~ 2 %, темпа падения реактивности за микрокампанию ~ – 2 %.

5) Разработана универсальная вычислительная платформа, с помощью которой удалось осуществить сбор, структурирование и анализ достаточности информации о выполненных измерениях в реакторе БН-800, занести ее в базу данных.

6) С помощью BNcode проведено авторское сопровождение эксплуатации энергоблока № 4 Белоярской АЭС в части работ научного руководителя, а именно: рассмотрена и согласована эксплуатационная и проектная документация на ТВС и активную зону; согласован объем перегрузок топлива перед нача-

лом каждой микрокампании, для чего проводились расчеты эксплуатации активной зоны в предстоящей микрокампании, подтверждающие соблюдение пределов и условий безопасной эксплуатации.

### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах**

1. CROSSER – программный модуль подготовки групповых констант для инженерных расчетов быстрых реакторов / В.Н. Кощеев, И.В. Тормышев, **В.А. Мишин** и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2020. – Вып. 4. – С. 16–25 (авторство не разделено).

2. Сравнительный анализ расчетно-экспериментальных расхождений нейтронно-физических характеристик реактора БН-800 / М.Ю. Семенов, Г.М. Михайлов, А.А. Перегудов, **В.А. Мишин** и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2022. – Вып. 1. – С. 30–39 (авторство не разделено).

3. Состояние разработки баз данных ядерных констант для расчетов быстрых реакторов на основе РОСФОНД и БНАБ-РФ / Г.Н. Мантуров, С.В. Забродская, **В.А. Мишин**, А.А. Перегудов и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2022. – Вып. 3. – С. 19–26 (авторство не разделено).

4. Расчетно-экспериментальный анализ нейтронно-физических характеристик активной зоны БН-800 в период перехода на загрузку смешанным оксидным уран-плутониевым топливом / М.Ю. Семенов, А.А. Перегудов, **В.А. Мишин** и др. // Атомная энергия. – 2023. – Том 135. – Вып. 1–2. – С. 3–10 (авторство не разделено).

5. Анализ точности расчета распределения энерговыделения в БН-800 / М.Ю. Семенов, А.А. Перегудов, **В.А. Мишин** и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2024. – Вып. 1. – С. 65–71 (авторство не разделено).

Тираж 80 экз. Заказ № 375. 28.11.2024  
Отпечатано с оригинала автора в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ».  
г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.