

На правах рукописи



ПАНОВА Дарья Владимировна

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ИСИДА
ДЛЯ ПОДГОТОВКИ И ВНЕДРЕНИЯ ГРУППОВЫХ
КОНСТАНТ БНАБ-РФ22 В ПРАКТИКУ РАСЧЕТОВ
РЕАКТОРОВ БН-600 И БН-800**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Обнинск – 2026

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 расчетных исследований безопасности АЭС
АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск

Официальные оппоненты: **Жемков Игорь Юрьевич**
доктор технических наук, главный научный сотрудник – эксперт акционерного общества «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов», г. Димитровград

Шкаровский Денис Александрович
кандидат физико-математических наук,
начальник отдела Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва.

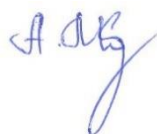
Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), г. Москва.

Защита состоится «23» сентября 2026 года в 14 часов 30 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 «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 75.1.077.01
доктор технических наук



А.В. Морозов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Проектирование и расчетное сопровождение ядерных энергетических установок обязательно включают оценку погрешности проектных параметров. Один из ключевых способов ее минимизации – применение надежного и апробированного константного обеспечения, гарантирующего точность моделирования физических процессов.

Расчетное сопровождение реакторов БН-600 и БН-800 осуществляется с использованием программных комплексов ГЕФЕСТ и ГЕФЕСТ800 с проектной библиотекой БНАБ-93.01а и программой подготовки макроконстант CONSYST. Длительная эксплуатация данного программного обеспечения продемонстрировала его надежность и эффективность.

Вместе с тем практический опыт выявил потенциальные направления совершенствования функциональных возможностей программных комплексов ГЕФЕСТ и ГЕФЕСТ800: введение учета аксиального перемещения стержней СУЗ с оценкой коэффициентов реактивности; реализация потвэльного расчета выбранных ТВС; расширенный учет нуклидов в изотопной кинетике; возможность расчета активной зоны реактора и подкритических систем обращения с ОЯТ с использованием метода Монте-Карло. Предложения по улучшению коснулись и программной архитектуры: устаревшая структура кодов не позволяет оперативно внедрять новые функциональные возможности, кроме того, необходимость параллельной поддержки двух версий – ГЕФЕСТ и ГЕФЕСТ800 – влечет за собой значительные трудозатраты и ресурсные издержки, что делает систему сопровождения избыточно сложной.

В связи с широко развернувшейся в последние годы программой ИТ-импортозамещения появилась возможность модернизации кодов ГЕФЕСТ и ГЕФЕСТ800.

Таким образом, был разработан программный комплекс ГЕФЕСТ-М, объединивший функционалы, необходимые для расчетного сопровождения обоих реакторов, в рамках одного программного комплекса. Ключевым изменением стала интеграция модуля расчета методом Монте-Карло эффективного коэффициента размножения нейтронов для активной зоны и подкритических узлов с ядерным топливом.

Обновление ПК ГЕФЕСТ-М, а в особенности появление в этом комплексе модуля расчета методом Монте-Карло, поставило перед разработчиками еще одну важную задачу: обновление существующей версии групповых констант БНАБ-93.01а с учетом реализации преемственности оцененных и групповых данных.

Стоит отметить, что необходимость перехода к новой версии групповой библиотеки определяется не только изменением в программном обеспечении расчетного сопровождения, но и с массовым внедрением метода Монте-Карло. За последние 25 лет этот метод стал основным инструментом в определении нейтронно-физических параметров – от оценки критичности до моделирования

кампаний топлива. В результате чего расчеты достигли реперного класса точности – методические погрешности стали существенно меньше константных; появились коды, работающие без групповой аппроксимации сечений нейтронных и гамма-реакций. При таком подходе использование библиотеки БНАБ-93.01а стало серьезно ограничено ввиду отсутствия согласованных библиотек констант для детальных расчетов с описанием энергетической структуры сечений, а также несовместимость с поточечными данными, необходимыми для современных методов.

Это означает, что новая версия константного обеспечения расчетов реакторов БН-600 и БН-800 должна быть сформирована на базе единой библиотеки оцененных ядерных данных (ОЯД). На сегодняшний день такой библиотекой в России является РОСФОНД. При этом важно обеспечить преемственность между групповыми и поточечными данными (для согласованности группового расчета с методом Монте-Карло).

В качестве основы для создания групповых констант решено использовать данные из библиотеки РОСФОНД. Первая версия библиотеки была опубликована в 2010 году – РОСФОНД-2010. Обновление данных для топливных и конструкционных материалов было аккумулировано в версии РОСФОНД-2020.2. Расширенная версия библиотеки, включившая современные апробированные данные, сейчас используется под названием РОСФОНД-2.24.

Таким образом, актуальность диссертационной работы заключается в обеспечении согласованности ОЯД и групповых констант для решения задач сопровождения реакторов БН-600 и БН-800 по прецизионным и диффузионным кодам с учетом современных требований.

Для этого в рамках диссертационной работы был создан программный комплекс (ПК) ИСИДА, для формирования библиотеки групповых констант (формат БНАБ) и библиотеки констант с поточечным слежением за энергией нейтрона (формат АСЕ) при расчете нейтронно-физических характеристик (НФХ) реакторов на быстрых нейтронах.

Цели и задачи работы

Целью диссертационной работы является формирование новой библиотеки групповых констант БНАБ-РФ22 с учетом следующих критериев:

1) учет данных для изотопов и естественных смесей в формате БНАБ-93 в групповом (28 групп) и мультигрупповом (299 групп) приближениях;

2) использование апробированных оценок нейтронных сечений топливных и конструкционных материалов;

3) обеспечение точности на уровне проектной библиотеки БНАБ-93.01а при переходе от урановой на полную загрузку уран-плутониевым топливом;

4) обеспечение преемственности файлов оцененных данных и новой библиотеки констант. Непротиворечивость результатов расчета НФХ с результатами, полученными при использовании БНАБ-93.01а;

5) возможность оценки методической составляющей погрешности, связанной с групповым представлением нейтронных сечений, при расчете основных функционалов БН-600 и БН-800.

Выполнение цели работы позволит перейти от библиотеки констант БНАБ-93.01а к более современной версии (БНАБ-РФ22) при расчетном сопровождении эксплуатации реакторов БН-600 и БН-800.

Для достижения поставленной цели были решены следующие научно-технические задачи:

1) создание ПК ИСИДА, реализующего цикл работ с ядерными данными: от их подбора до создания групповых констант (формат БНАБ) и констант с поточечным слежением за энергией нейтрона (формат АСЕ) для применения при расчете НФХ реакторов на быстрых нейтронах;

2) обеспечение автоматизации процесса формирования групповых констант для уменьшения затраченного времени и устранения ошибок, связанных с человеческим фактором;

3) подготовка наборов библиотек по различным современным оцененным ядерным данным (ОЯД) в формате АСЕ для проведения кросс-верификационных расчетов;

4) создание системного архива результатов расчета бенчмарк-экспериментов и тестовых моделей для проведения верификационных тестов в обоснование точности предсказания реакторных характеристик на основе отобранных или вновь созданных файлов нейтронных данных;

5) формирование новой версии библиотеки групповых констант БНАБ-РФ22;

6) оценка методической составляющей погрешности величины критичности, эффективности стержней СУЗ и энерговыделения при расчете по новой библиотеке групповых констант для РУ БН-600 и РУ БН-800;

7) внедрение новой версии библиотеки групповых констант в практику расчетов активных зон реакторов БН-600 и БН-800 при расчетном сопровождении эксплуатации для решения задачи согласованности констант, используемых при расчете по инженерным (диффузионным) и прецизионным (с детальным слежением за энергией нейтронов) кодам.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

В рамках данной работы был разработан программный комплекс для подготовки и внедрения групповой библиотеки констант в практику расчетов реакторов БН-600 и БН-800. Проведен расчетный анализ НФХ при использовании новой версии групповых констант для активной зоны реакторов БН-600 (урановая загрузка) и 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 для сопровождения реакторов БН-600 и БН-800 создана групповая версия библиотеки констант, с помощью которой удалось решить задачу согласованности констант, используемых при расчете по инженерным и прецизионным кодам.

Создан программный комплекс, объединяющий цикл работ по константному обеспечению расчетов реакторов на быстрых нейтронах, включая отбор библиотеки исходных файлов ОЯД, их переработку в различные форматы для практического использования, проведение верификационных расчетов для определения расчетных погрешностей. Создание программного комплекса позволяет сохранить накопленный за долгие годы опыт формирования групповых констант, ускоряет процедуру их подготовки, снижает ошибку, связанную с человеческим фактором.

С использованием новой библиотеки групповых констант БНАБ-РФ22 проведены верификационные расчеты и обоснованы методические расчетные погрешности для величины критичности, эффективности стержней СУЗ и энерговыделения.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. С использованием программного комплекса ИСИДА сформирована и верифицирована библиотека групповых констант БНАБ-РФ22 для расчета НФХ активных зон реакторов БН-600, БН-800.

2. Библиотека групповых констант БНАБ-РФ22 включила в себя проверенные современные оценки нейтронных сечений для топливных и конструкционных материалов, а также мультигрупповые зависимости для всех материалов.

3. С использованием подготовленных групповых констант БНАБ-РФ22 оценена методическая составляющая погрешности, связанная с групповым представлением нейтронных сечений.

4. Библиотека констант БНАБ-РФ22 прошла кросс-верификацию с проектной библиотекой БНАБ-93.01а.

5. Новая версия групповых констант БНАБ-РФ22 внедрена в практику расчетов реакторов БН-600 и БН-800 с использованием расчетных кодов TRIGEX, ММККЕНО и коду Белоярской АЭС ГЕФЕСТ-М. Получен Акт от 23.12.2024 № 224/2.2-34/365.

Методология и методы исследования

Для формирования надежной библиотеки групповых констант, необходимой для вычисления НФХ реакторов, работающих на быстрых нейтронах, были использованы следующие методы исследования.

1. Для верификации библиотек ОЯД определены критерии отбора бенчмарк-экспериментов. Они должны: описывать быстрый энергетический спектр нейтронов; обладать характеристиками, которые в большей степени соответствуют реальным быстрым реакторным системам (описываемый спектр, топливный состав, состав конструкционных материалов); иметь различный топливный состав, включая сборки с высоким обогащением по урану и плутонию.

2. На основе критериев отбора бенчмарк-экспериментов составлен список, включивший: компактные металлические сборки с высокообогащенным ураном (GODIVA, FLATTOP-25 и другие) и плутонием (JEZEBEL, FLATTOP-Pu и другие) из международного справочника ICSBER Handbook; быстрые реакторные системы, моделирующие состав активных зон реакторов типа БН с урановой загрузкой (сборки типа ZPR) и с загрузкой МОКС-топливом (сборки типа ZPPR) из международного справочника IRPhEP Handbook; тестовые модели активных зон реакторов на быстрых нейтронах.

3. Расчет величины критичности осуществляется с использованием метода Монте-Карло (прецизионный код ММК: расчет в группах – ММККЕНО; поточечный расчет – ММКС) и диффузионного кода TRIGEX;

4. По результатам кросс-верификации библиотек ОЯД сформулированы рекомендации по выбору исходных файлов для формирования новой библиотеки групповых констант.

5. С помощью процессингового кода NJOY подготовлены файлы нейтронных данных в групповом (28 групп) и мультигрупповом (299 групп) приближении.

6. Проведение кросс-верификационных расчетов в обоснование обеспечения точности результатов, полученных по БНАБ-РФ22 в сравнении с проектной библиотекой БНАБ-93.01а, влияющих на проектные характеристики активных зон реакторов БН-600 и БН-800.

Таким образом, методология и методы исследования, использованные в диссертационной работе, позволяют получить надежную и апробированную библиотеку групповых констант.

Положения, выносимые на защиту

1. Программный комплекс ИСИДА для подготовки и внедрения библиотеки групповых констант БНАБ-РФ22 в практику расчетов реакторов БН-600 и БН-800.

2. Системный архив результатов расчета бенчмарк-экспериментов и тестовых моделей реакторов для верификации библиотек констант.

3. Библиотека групповых констант БНАБ-РФ22 для расчетного сопровождения эксплуатации реакторов БН-600 и БН-800.

4. Результаты расчетного анализа реальных состояний реакторов БН-600 и БН-800 с использованием библиотеки групповых констант БНАБ-РФ22.

Степень достоверности и апробация результатов

Файлы констант для расчетов подготавливались с использованием процессингового кода NJOY. Для проверки достоверности полученных данных при подготовке констант применялся пакет программ GRUCON.

Результаты нейтронно-физических расчетов (НФР) получены с помощью аттестованных Ростехнадзором программ TRIGEX, ММКК, ММКС.

Апробация результатов

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

1) Научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-2022)» (с 31 мая по 3 июня 2022 г., г. Обнинск, Россия);

2) «Международная научно-практическая конференция молодых специалистов, ученых и аспирантов (Волга-2022)» (5–9 сентября 2022 г., БО НИЯУ МИФИ «Волга», Тверская обл., Россия);

3) «XVI Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров» (26–27 октября 2023 г., г. Обнинск, Россия);

4) «XXII научная школа молодых ученых ИБРАЭ РАН» (23–24 мая 2023 г., г. Москва, Россия);

5) «XXIII научная школа молодых ученых ИБРАЭ РАН» (14–15 мая 2024 г., г. Москва, Россия);

6) Научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-2024)» (28–31 мая 2024 г., г. Обнинск, Россия);

7) XVII Международная конференция «Забабахинские научные чтения» (19–23 мая 2025 г., г. Снежинск, Россия);

8) I Международная научно-техническая конференция для студентов, молодых ученых и специалистов: «Современные подходы и инновации в атомной энергетике» (23–24 октября 2025 г., г. Нововоронеж, Россия).

Личный вклад автора

1. Разработан программный комплекс ИСИДА для подготовки и внедрения библиотеки групповых констант в практику расчетов реакторов БН-600 и БН-800.

2. Создан модуль для сравнения зависимости сечений от энергии для разных типов ядерных реакций на основе графической визуализации.

3. Осуществлена автоматизация процесса работы с файлами ядерных данных в рамках ПК ИСИДА:

– разработаны шаблоны входных заданий NJOY и GRUCON для подготовки групповых и поточечных данных;

– переработаны постпроцессинговые программы (включая перенос кода с Lahey Fortran на Intel Fortran) для подготовки данных в формате таблиц БНАБ и их конвертации в бинарный вид;

– создана постпроцессинговая программа формирования служебного файла XSDir для проведения расчетов по MCNP.

4. Сформирован архив результатов расчета бенчмарк-экспериментов и тестовых моделей реакторов на быстрых нейтронах:

– отобраны бенчмарк-эксперименты и тестовые модели для верификации библиотек констант применительно к расчетам быстрых реакторов;

– подготовлены наборы библиотек по различным современным оценённым ядерным данным в формате ACE для проведения кросс-верификационных расчетов;

– проведены расчеты отобранных бенчмарк-экспериментов и тестовых моделей по подготовленным оценённым ядерным данным.

5. Создана библиотека групповых констант БНАБ-РФ22 с помощью ПК ИСИДА, включая основные нейтронные сечения, факторы резонансной самоэкранировки, коэффициенты Доплера, спектры деления для основных топливных нуклидов, данные по запаздывающим нейтронам.

6. Выполнен расчет основных проектных характеристик реакторов БН-600 и БН-800 с использованием библиотек групповых констант БНАБ-93.01а и БНАБ-РФ22, а именно: параметра критичности, запаса реактивности, темпа потери реактивности на выгорание топлива, температурного и мощностного эффектов реактивности, эффективности одиночных и групп ОР СУЗ, эффективной доли запаздывающих нейтронов, распределения поля энерговыделения.

7. Выполнена оценка методической составляющей погрешности параметра критичности, эффективности групп ОР СУЗ и энерговыделения при расчете по новой библиотеке групповых констант для реакторов БН-600 и БН-800.

Публикации

Основные публикации по теме диссертации изложены в шести статьях в журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации 162 страницы, в том числе 60 рисунков и 26 таблиц. Список литературы содержит 58 наименований.

Во введении рассмотрены основные этапы развития константного обеспечения НФР реакторов на быстрых нейтронах. Показана необходимость создания константного обеспечения для расчетного сопровождения реакторов БН-600 и БН-800 на основе проверенных методов подготовки групповых констант с помощью нового программного обеспечения.

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

Первая глава посвящена описанию архитектуры ПК ИСИДА, приведено описание интерфейсов и принципов работы отдельных программных элементов.

Созданный в рамках этой работы ПК ИСИДА обеспечивает работу независимых функционалов, предназначенных для:

– управления библиотеками ОЯД, графического сравнительного анализа данных с целью исследования применимости и оптимального выбора файлов нейтронных данных для подготовки библиотек констант конкретного назначения;

– формирования новых файлов реакторных констант в энергетически непрерывном, групповом и мультигрупповом представлениях;

– верификации библиотек нейтронных данных в энергетически непрерывном и групповом представлениях на наборе бенчмарк-экспериментов и тестовых моделей из программного архива ИСИДА.

Программный комплекс обеспечивает:

- интерактивное управление элементами графического анализа данных;
- возможность подключения различных библиотек ОЯД в формате ENDF-6;
- работу алгоритмов автоматического создания входных расчетных заданий для интегрированных процессинговых кодов NJOY и GRUCON;
- доступ к обширному набору бенчмарк-экспериментов критических и подкритических реакторных систем, а также полномасштабных моделей энергетических реакторов на быстрых нейтронах с возможностью проведения верификации имеющихся или вновь созданных файлов констант.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема структуры ПК ИСИДА.

Концепция архитектуры программы объединяет функционалы трех независимых модулей: работа с информационно-справочными данными в рабочей среде «Карта нуклидов»; обработка нейтронных данных в рабочей среде «Подготовка констант»; верификация библиотек констант в рабочей среде «Верификация».

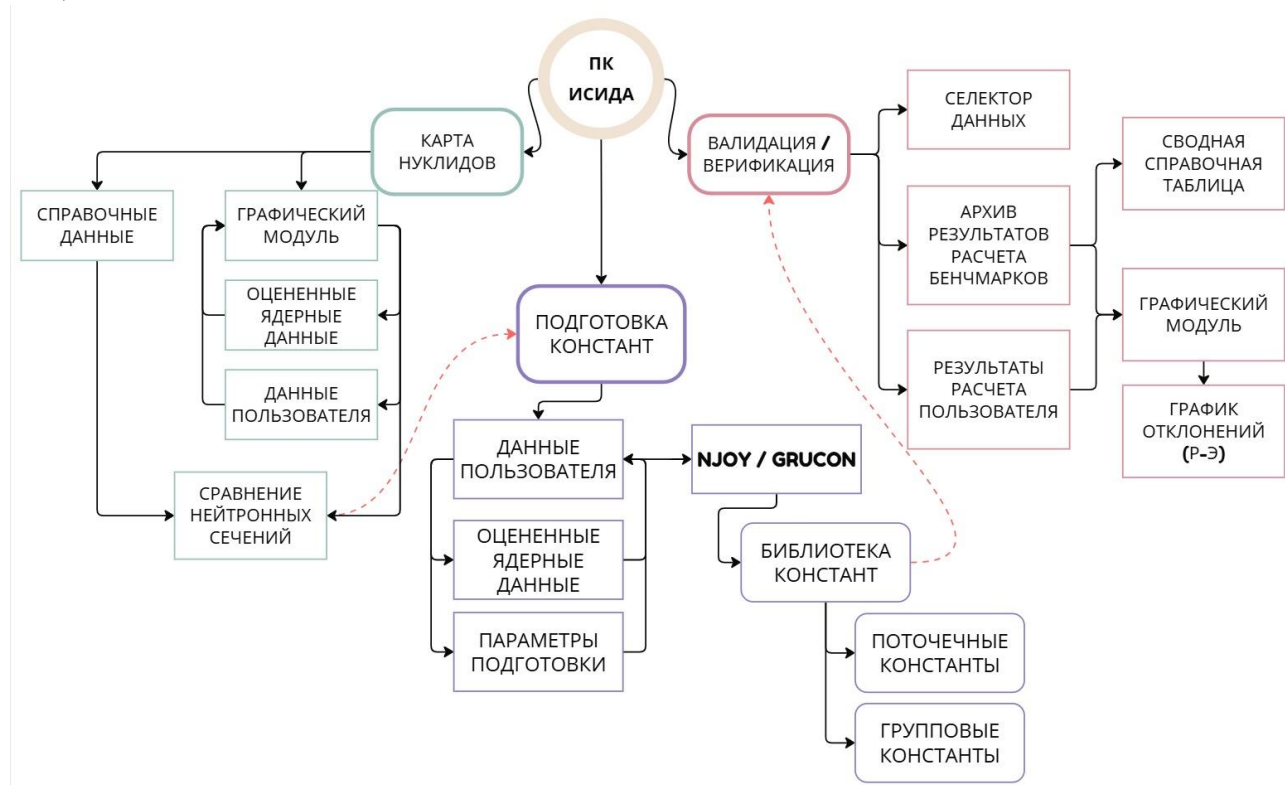


Рисунок 1 – Общая схема архитектуры ИСИДА

В рамках ИСИДА решены важные задачи:

1. Достигнута кросс-платформенность для ОС Windows и Astra Linux, что поддерживает национальную стратегию импортозамещения.

2. Интегрирована Российская библиотека РОСФОНД с возможностью подключения зарубежных библиотек данных в формате ENDF.

3. Разработан графический модуль для визуализации данных, обеспечивающий быстрый доступ к базам и графическому представлению информации.

4. Интегрирован модуль автоматизации подготовки библиотек констант для НФР с использованием различных форматов.

5. Реализован функционал верификации библиотек констант на основе пользовательских бенчмарк-экспериментов.

6. Организовано хранение алгоритмов и программ обработки ОЯД.

Результаты проделанной работы были использованы для подготовки новой библиотеки групповых констант для расчета НФХ реакторов БН-600 и БН-800.

Вторая глава описывает создание системного архива бенчмарк-экспериментов и тестовых моделей программного комплекса ИСИДА.

В ходе работы сформирован системный архив результатов расчета бенчмарк-экспериментов и тестовых моделей реакторных установок с целью обоснования применимости файлов констант, подготовленных в ПК ИСИДА, для расчета нейтронно-физических параметров реакторных установок.

Для наполнения системного архива файлы библиотек ОЯД ENDF/B-VII.1, ENDF/B-VIII.0, JEFF-3.3, JENDL-4.0, РОСФОНД-2010, РОСФОНД-2.24 были переведены в формат поточечного представления данных для расчета бенчмарк-экспериментов. Результаты расчета получены по кодам, реализующим метод Монте-Карло, ММКС/МСНР.

Актуальный функционал ПК ИСИДА по верификации библиотек констант позволяет проводить анализ результатов верификационных расчетов критичности для следующих тестовых наборов:

1) критические эксперименты сферической конфигурации с высокообогащенным ураном и плутонием, так называемые бомбы (13 экспериментов);

2) критические эксперименты с активными зонами с ураном и плутонием с k_{∞} , близким к единице (16 экспериментов);

3) эксперименты с урановым, плутониевым и смешанным уран-плутониевым топливом (сборки ZPR и ZPPR – 26 экспериментов);

4) эксперименты, характеризующие конструкционные материалы – компоненты сталей Fe, Cr, Ni, а также Al, Cu, Zr, Zn, W и другие (всего 14 экспериментов);

5) эксперименты с урановыми и плутониевыми растворами для расчетов ядерной безопасности (148 экспериментов);

6) экспериментальные сборки БФС с натриевым и свинцовым теплоносителем, а также эксперименты по моделированию активных зон реакторов БН-600 и БН-800 (16 экспериментов);

7) уникальные полномасштабные тестовые модели энергетических реакторов БН-600 и БН-800 с различной конфигурацией активной зоны (8 моделей);

8) тестовые модели реакторов на быстрых нейтронах (МБИР, FFTF, БРЕСТ-ОД-300 и другие – всего 6 моделей).

База данных ПК ИСИДА на сегодняшний день включает результаты расчета и экспериментальные данные для более чем 200 бенчмарк-экспериментов и тестовых моделей, однако это не исключает возможности пополнения базы данных.

С использованием результатов расчетов экспериментов, помещенных в архив ПК ИСИДА, было показано обоснование выбора файлов ОЯД для расчетного сопровождения реакторных установок БН-600 и БН-800. Продемонстрировано снижение константной составляющей погрешности применительно к реакторам БН-600 и БН-800 при использовании отобранных экспериментов. Это дает пользователю возможность выбора необходимого класса экспериментов или отдельных результатов, которые можно экспортировать в виде численных значений или графика.

Взаимодействие с базой данных осуществляется при помощи интерфейса, показанного на рисунке 2.

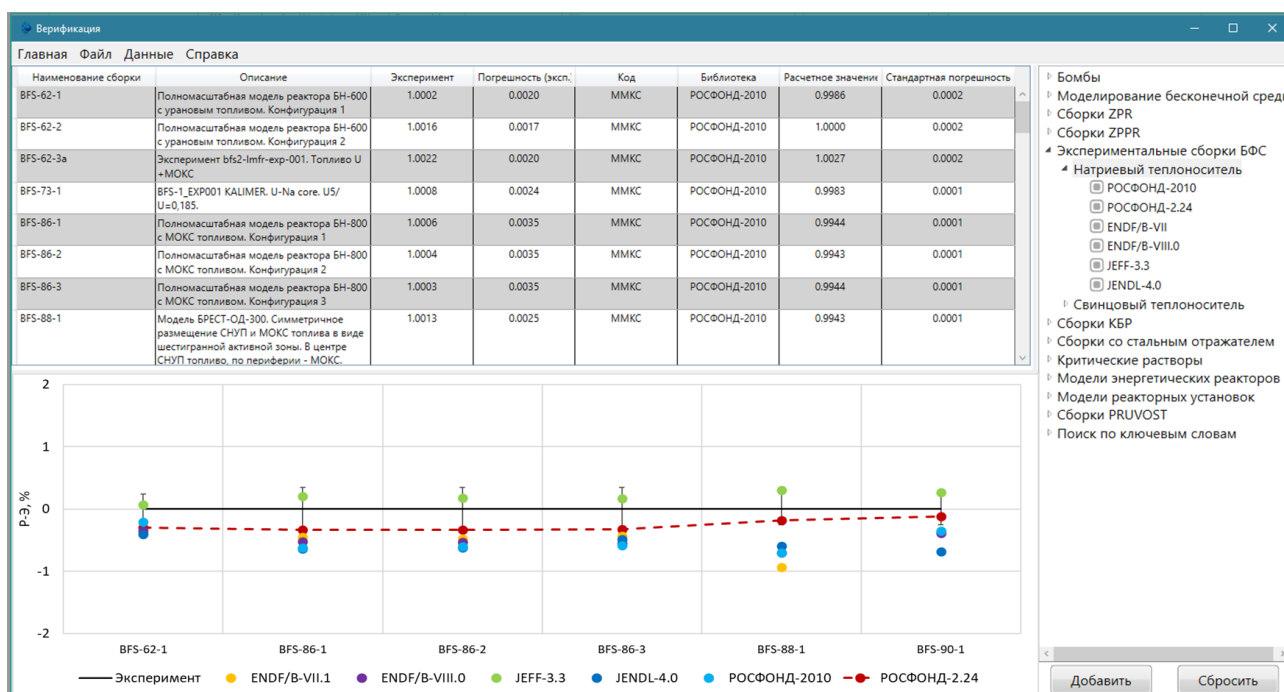


Рисунок 2 – Интерфейс рабочей среды «Верификация»

Таким образом, архив результатов расчетов бенчмарк-экспериментов и тестовых моделей программного комплекса ИСИДА не только обеспечивает надежный функционал для верификации библиотек констант в области НФР реакторов БН-600 и БН-800, но и способствует развитию проблемно-ориентированного константного обеспечения для различных типов ядерных реакторов.

В третьей главе приведено описание обоснования выбора исходной библиотеки ОЯД для формирования групповой библиотеки констант применительно к расчету реакторов БН-600 и БН-800. В этой главе описаны параметры содержания библиотек ОЯД, алгоритмы подготовки поточечных и групповых констант, реализованные в ПК ИСИДА.

В ПК ИСИДА реализован функционал по подготовке поточечных и групповых констант с использованием интегрированных программ NJOY и GRUCON. С целью проверки качества интерпретации входных заданий для подготовки констант в ПК ИСИДА были проведены кросс-верификационные расчеты бенчмарк-моделей урановых и плутониевых систем с жестким спектром по коду MCNP с использованием файлов констант, подготовленных с помощью NJOY и GRUCON.

По результатам кросс-верификации сделан вывод, что интерпретатор входных заданий ИСИДА не нарушает алгоритмов работы NJOY и GRUCON и не вносит дополнительную погрешность в методическую составляющую.

Для обоснования выбора исходных файлов ядерных данных для формирования новой библиотеки групповых констант для задачи расчетного сопровождения реакторов БН-600 и БН-800 были взяты библиотеки ENDF/B-VII.1, ENDF/B-VIII.0, JEFF-3.3, JENDL-4.0, РОСФОНД-2010, РОСФОНД-2.24. С помощью ПК ИСИДА они были переведены в поточечный формат и верифицированы на наборе бенчмарк-экспериментов и тестовых моделей в рабочей среде «Верификация».

Сравнение полученных значений $k_{эф}$ было проведено для:

- 1) бенчмарк-экспериментов с высоким обогащением по урану и плутонию, так называемых бомб;
- 2) бенчмарк-экспериментов с активными зонами с ураном и плутонием с k_{∞} , близким к единице;
- 3) сборок ZPR и ZPPR с различными видами топлива, описывающих жесткий спектр;
- 4) сборок KBR с большим содержанием Ni, Fe, Mo, Cr и Zr;
- 5) экспериментальных сборок БФС, описывающих полномасштабные эксперименты по моделированию активных зон реакторов БН-600, БН-800;
- 6) тестовых моделей энергетических реакторов (БН-600, БН-800).

На рисунках 3 – 8 показано расчетно-экспериментальное отклонение полученных значений $k_{эф}$ для заданного списка бенчмарков и библиотек ядерных данных.

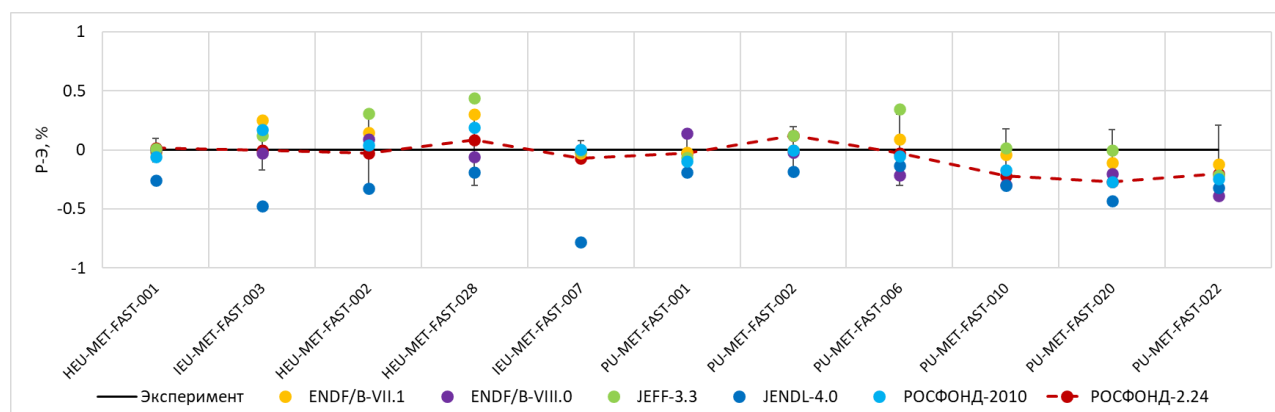


Рисунок 3 – Расчетно-экспериментальное отклонение $k_{эф}$ для сборок с высоким обогащением по U/Pu

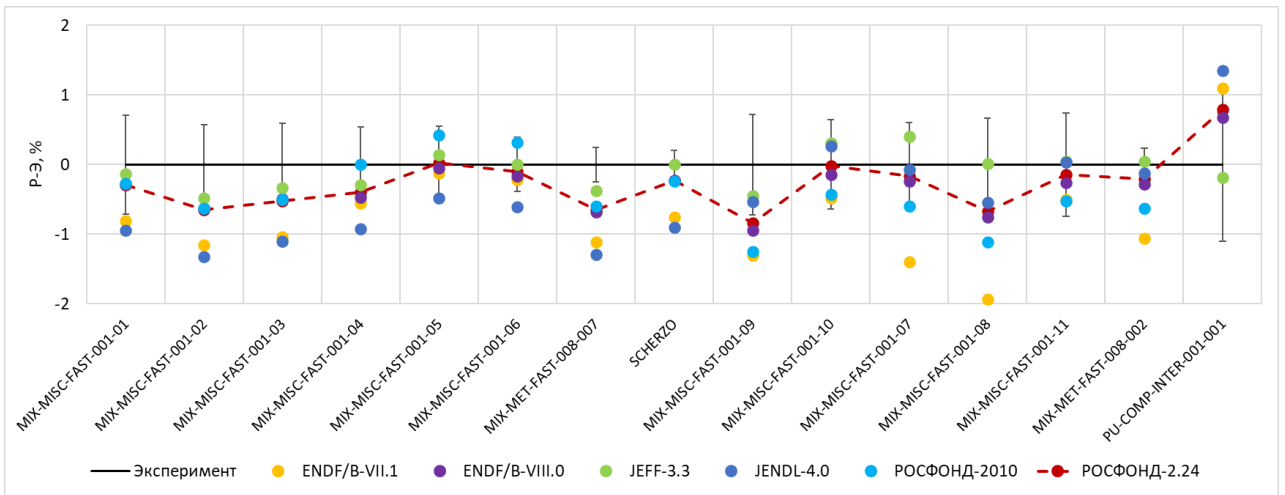


Рисунок 4 – Расчетно-экспериментальное отклонение для экспериментов с k_{∞} , близким к единице

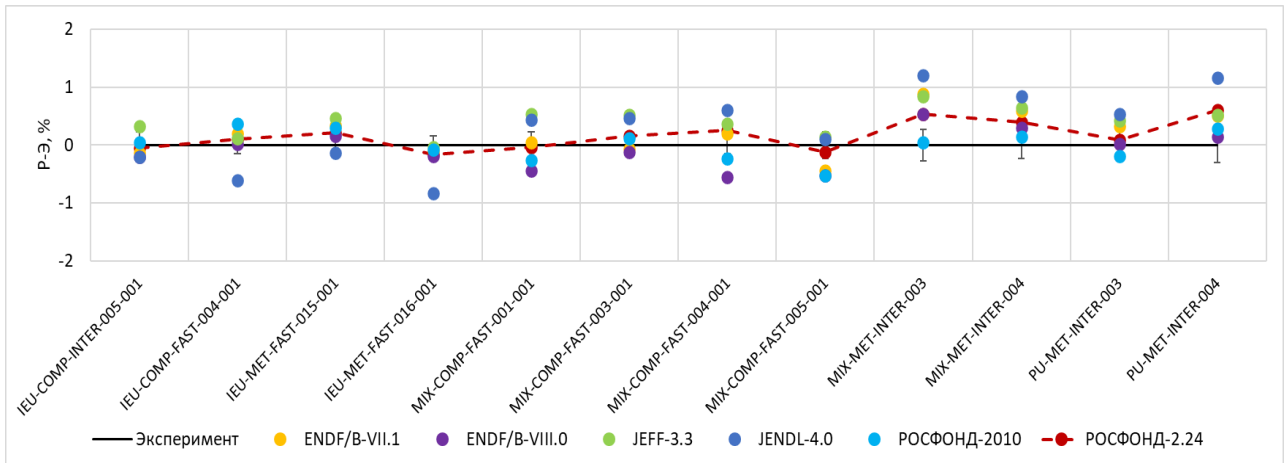


Рисунок 5 – Расчетно-экспериментальное отклонение $k_{эф}$ для сборок ZPR

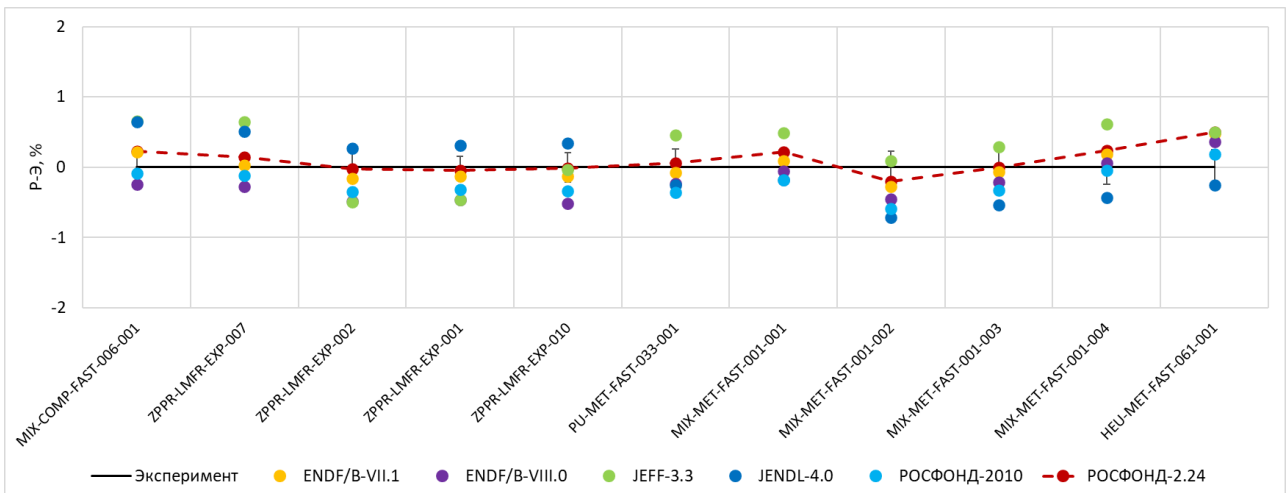


Рисунок 6 – Расчетно-экспериментальное отклонение $k_{эф}$ для сборок ZPPR

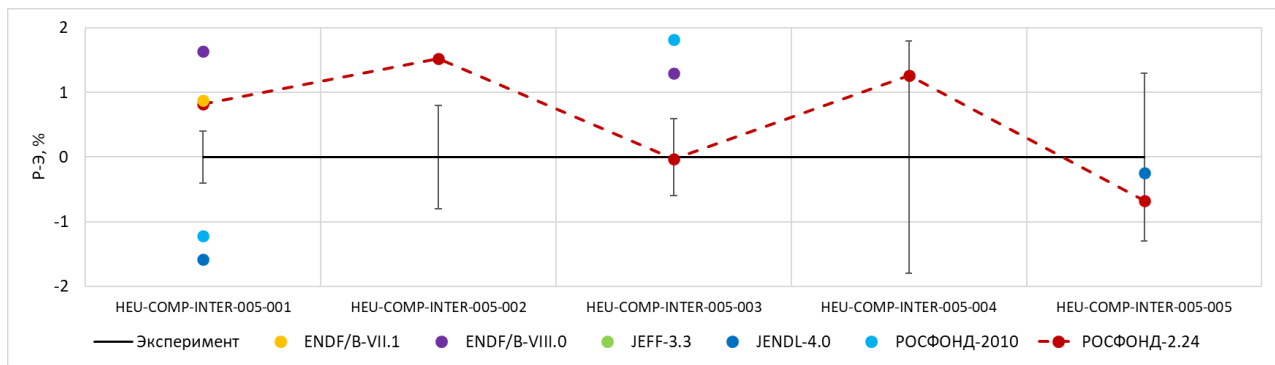


Рисунок 7 – Расчетно-экспериментальное отклонение $k_{эф}$ для сборок КВР

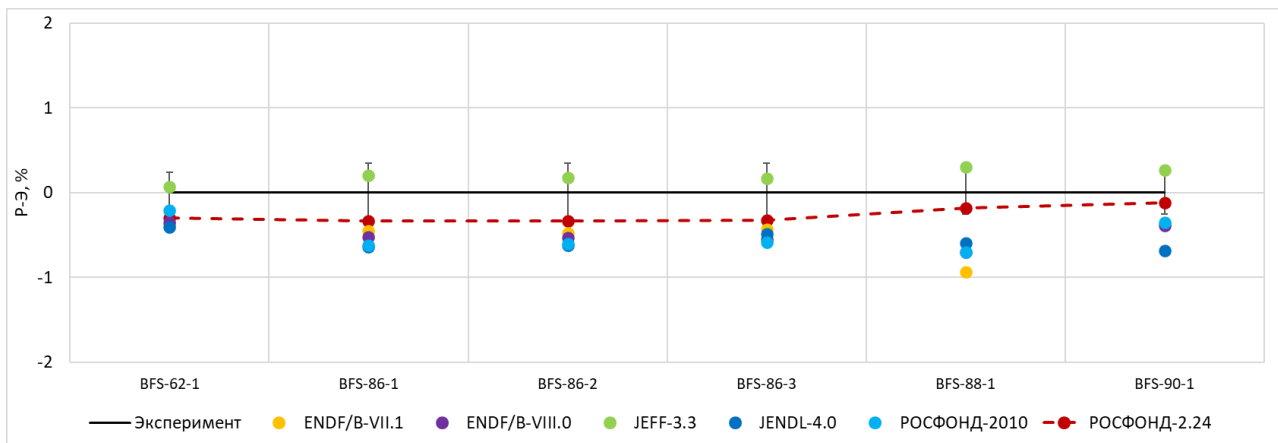


Рисунок 8 – Расчетно-экспериментальное отклонение $k_{эф}$ для сборок БФС с натриевым теплоносителем

В таблице 1 приведены результаты оценки среднего отклонения и значения дисперсии.

Таблица 1 – Среднее отклонение и дисперсия для набора библиотек и групп экспериментов

Группа	Параметр	Библиотека					
		ENDF/B-VII.1	ENDF/B-VIII.0	JEFF-3.3	JENDL-4.0	РОСФОНД-2010	РОСФОНД-2.24
U/Pu эксп-ты	Ср. откл.	0,05	-0,04	0,11	-0,30	-0,04	-0,04
	Дисперсия	0,05	0,04	0,09	0,07	0,05	0,05
U/Pu эксп-ты с k_{∞}	Ср. откл.	-0,63	-0,21	0,06	-0,35	-0,03	-0,16
	Дисперсия	0,66	0,34	0,39	0,66	1,41	0,34
Сборки ZPR	Ср. откл.	0,19	-0,07	0,40	0,30	0,00	0,17
	Дисперсия	0,12	0,10	0,05	0,38	0,07	0,06
Сборки ZPPR	Ср. откл.	0,03	-0,20	0,33	0,05	-0,19	0,11
	Дисперсия	0,04	0,06	0,18	0,20	0,04	0,03
Сборки БФС	Ср. откл.	-0,51	-0,51	0,20	-0,57	-0,51	-0,26
	Дисперсия	0,04	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01
Сборки КВР	Ср. откл.	2,12	2,40	2,80	2,54	2,83	0,58
	Дисперсия	40,35	34,70	28,24	32,93	14,88	0,68

На рисунках 9, 10 показано изменение величины критичности по отношению к 76 микрокампании (МК) и 8 микрокампании, полученное при расчете моделей активных зон реакторов БН-600 и БН-800.

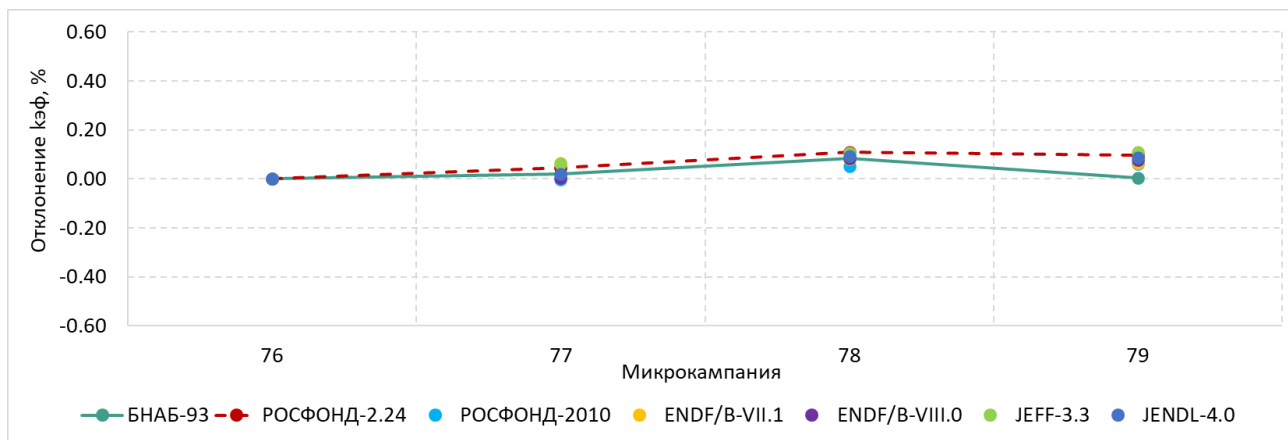


Рисунок 9 – Изменение значения $k_{эф}$ по отношению к 76 МК РУ БН-600

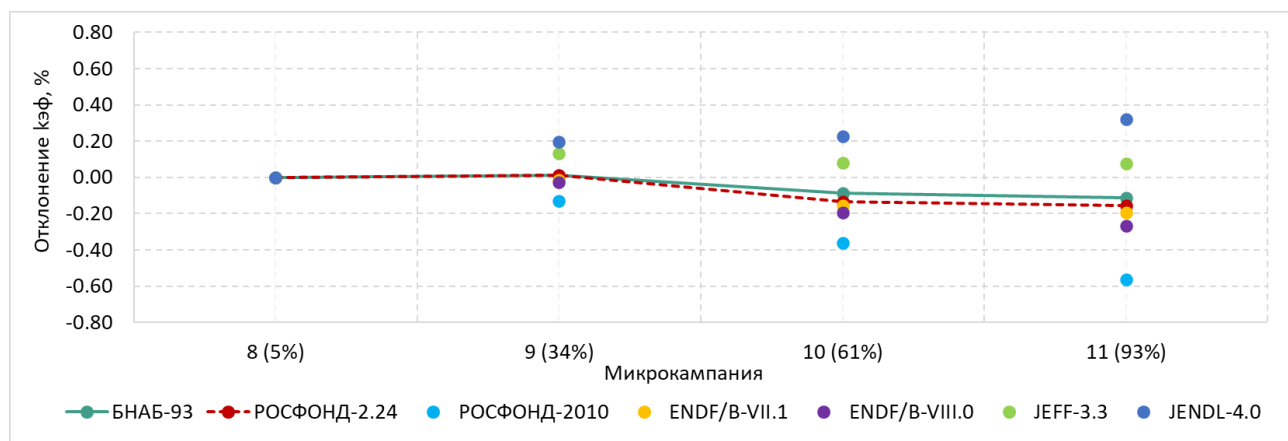


Рисунок 10 – Изменение значения $k_{эф}$ по отношению к 8 МК РУ БН-800

По результатам верификации на наборе бенчмарк-экспериментов и тестовых моделей реакторов из системного архива ПК ИСИДА сделаны следующие выводы:

1. Наилучшие совпадения с экспериментальными данными были получены для библиотек ENDF/B-VIII.0 и РОСФОНД-2.24, особенно в расчетах критичности для экспериментов с высоким обогащением по урану и плутонию.

2. Расчетное значение величины критичности для а.з. реактора БН-600 ведет себя стабильно при переходе от одной микрокампании к другой при использовании всех отобранных библиотек констант.

3. Наилучшим образом критичность при переходе на МОКС-топливо реактора БН-800 описывают результаты расчетов, полученные с использованием библиотеки констант РОСФОНД-2.24.

4. Расчетные значения величины критичности по библиотеке констант РОСФОНД-2.24 не противоречат проектной библиотеке БНАБ-93.01а при расчете моделей реакторов БН-600 и БН-800.

Библиотека РОСФОНД-2.24 продемонстрировала стабильные результаты для всех отобранных типов тестов, поэтому для формирования новой версии библиотеки групповых констант и последующего ее внедрения в практику расчетов реакторов БН-600 и БН-800 рекомендовано использовать РОСФОНД-2.24.

В четвертой главе описан этап адаптации и внедрения групповых констант БНАБ-РФ22 в практику расчетов реакторов БН-600 и БН-800.

Приведено описание методики подготовки файлов с помощью ПК ИСИДА, рассмотрены структура и характеристики библиотеки групповых констант БНАБ-РФ22.

Библиотека БНАБ-РФ22 содержит таблицы основных констант; таблицы факторов резонансной самоэкранировки и коэффициентов Доплера для основных реакторных нуклидов, вклады от которых в величину эффекта Доплера являются определяющими; таблицы данных функционалов нейтронных полей и данных по запаздывающим нейтронам, представленные для восьми групп запаздывающих нейтронов. Для делящихся нуклидов в мультигрупповом представлении добавлены данные о спектре деления с целью оптимизации времязатрат при подготовке макроконстант.

В этой главе проведен ряд верификационных расчетов НФХ реальных состояний активных зон РУ БН-600 и РУ БН-800. Расчеты проведены с использованием системы констант CROSSER / БНАБ-РФ22. Результаты расчетов были сопоставлены с результатами измерений и данными, полученными по БНАБ-93.01а.

Расчетные модели взяты из архива вычислительного комплекса по расчетному сопровождению BNcode:

- 76 микрокампания реактора БН-600 (урановое топливо);
- 8–11 микрокампании реактора БН-800 (переход на полную загрузку МОКС-топливом).

Расчеты проводились по кодам ММК и TRIGEX для основных НФХ:

- параметр критичности;
- запас реактивности;
- темп потери реактивности;
- эффективность одиночных стержней СУЗ;
- температурный и мощностной эффекты реактивности;
- эффективная доля запаздывающих нейтронов;
- энерговыделение.

Расчет программе ММКК выполнен в P_5 -приближении в 299 группах для гомогенной и гетерогенной тестовых моделей. Расчет по программе ММКС выполнялся с использованием файлов библиотеки РОСФОНД-2.24 в непрерывно энергетическом приближении. Статистическая погрешность в $k_{эф}$ при расчетах по программам ММКК и ММКС составляла 10^{-4} .

На рисунке 11 представлены результаты расчета $k_{эф}$ по программе ММКК с использованием трех библиотек констант: БНАБ-93.01а, БНАБ-РФ10 и БНАБ-РФ22. Расчет выполнен в 299 группах в гетерогенном приближении (гетерогенно выделены твэлы в ТВС и ПЭЛы в стержнях СУЗ).

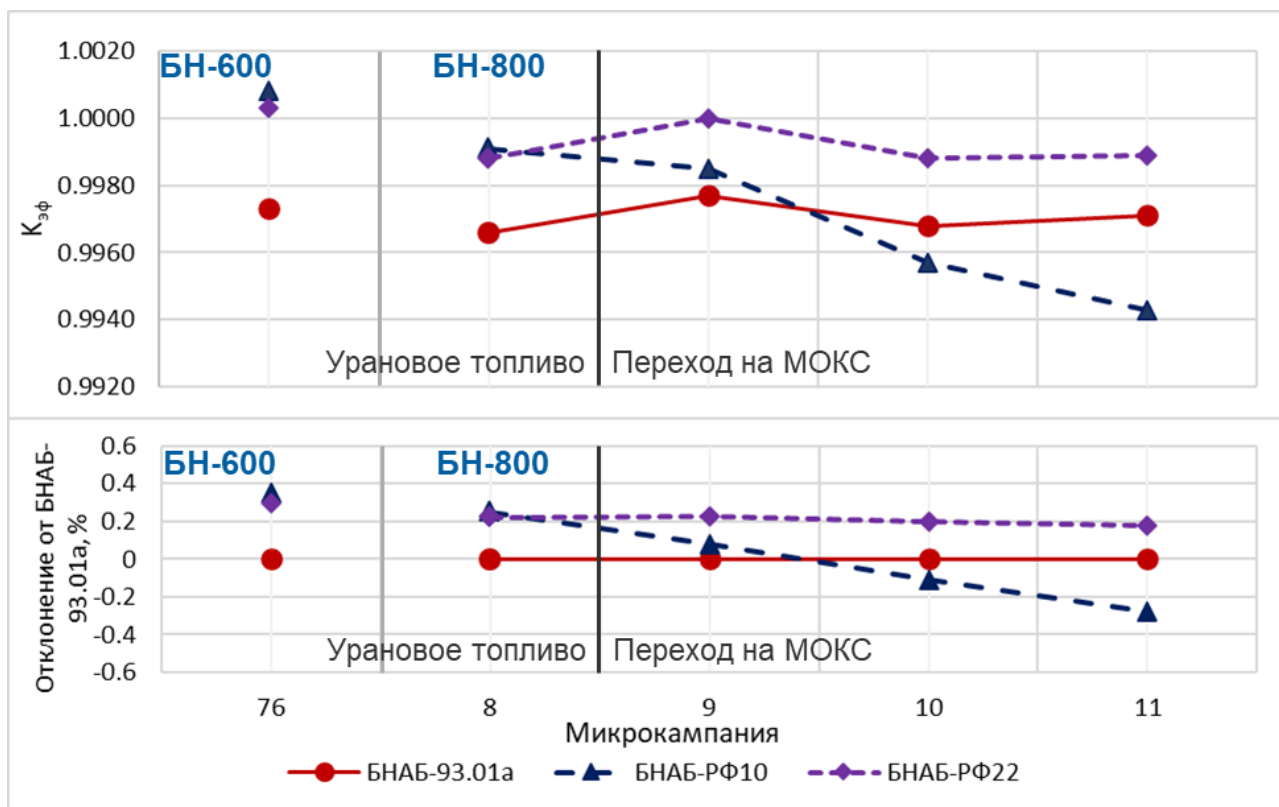


Рисунок 11 – Результаты расчета $k_{эф}$ реакторов БН-600, БН-800

Исходя из полученных результатов, были сделаны следующие выводы:

1) для РУ БН-600 использование как БНАБ-РФ10, так и БНАБ-РФ22 приводит к увеличению параметра критичности на $\sim 0,3\%$. В этом случае расхождение с критическим состоянием реактора уменьшается с $-0,3\%$ до $+0,1\%$;

2) для РУ БН-800 использование БНАБ-РФ10 приводит к уменьшению параметра критичности на $-0,5\%$ по мере увеличения доли МОКС-топлива в составе активной зоны. При использовании библиотеки БНАБ-РФ22 данный тренд не наблюдается, как и для проектной библиотеки БНАБ-93.01а;

3) использование в расчетах БНАБ-РФ22 приводит к уменьшению расхождения с критическим состоянием реактора до $-0,1\%$ (для БНАБ-93.01а расхождение составляет $-0,3\%$);

4) результаты, полученные с использованием библиотек констант БНАБ-93.01а и БНАБ-РФ22, не противоречат друг другу.

Расчет запаса и темпа потери реактивности, а также эффективности одиночных стержней СУЗ был проведен по коду ММКК с использованием библиотек БНАБ-93.01а и БНАБ-РФ22. Статистическая погрешность составляла 10^{-4} .

На рисунке 12 показан график полученных расчетных значений и расчетно-экспериментальных отклонений максимального запаса реактивности для 76 микрокампании реактора БН-600 и 8–11 микрокампаний реактора БН-800.

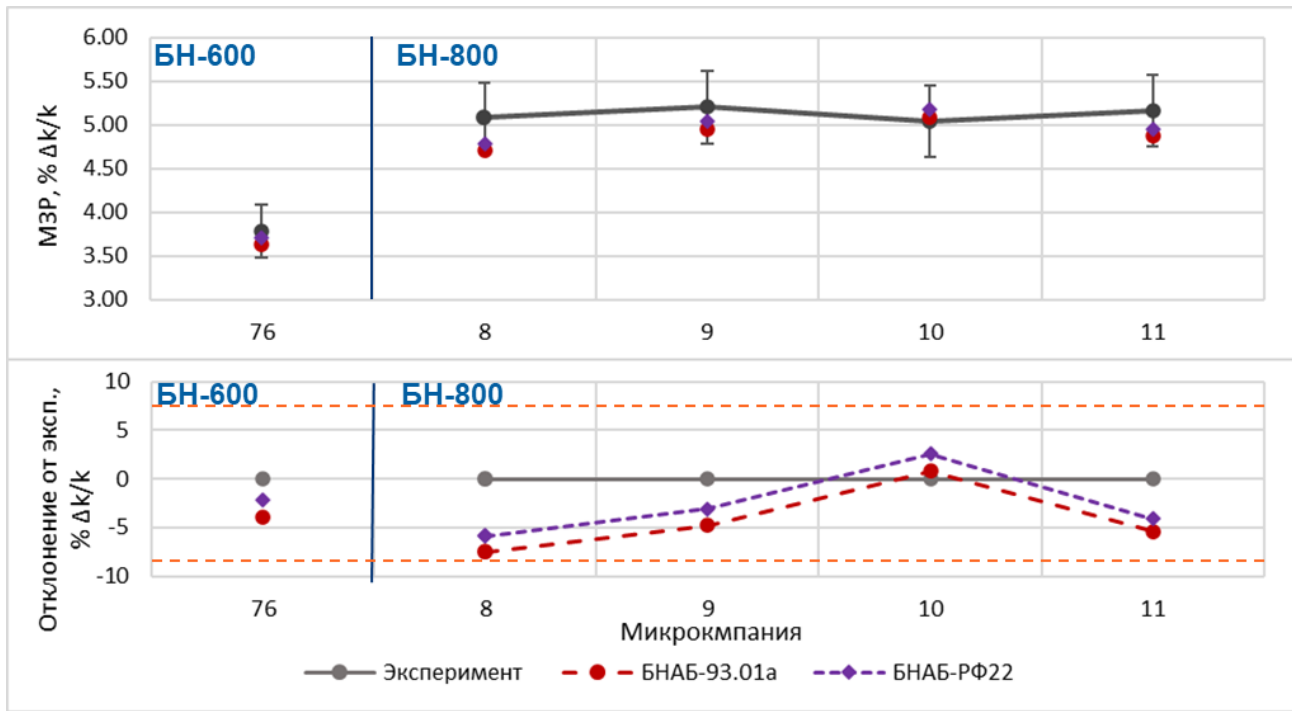


Рисунок 12 – Результаты расчета запаса реактивности реакторов БН-600, БН-800

На рисунке 13 представлены усредненные по группам стержней СУЗ значения расчетно-экспериментальных отклонений. На каждом рисунке выделен коридор $\pm 10\%$.

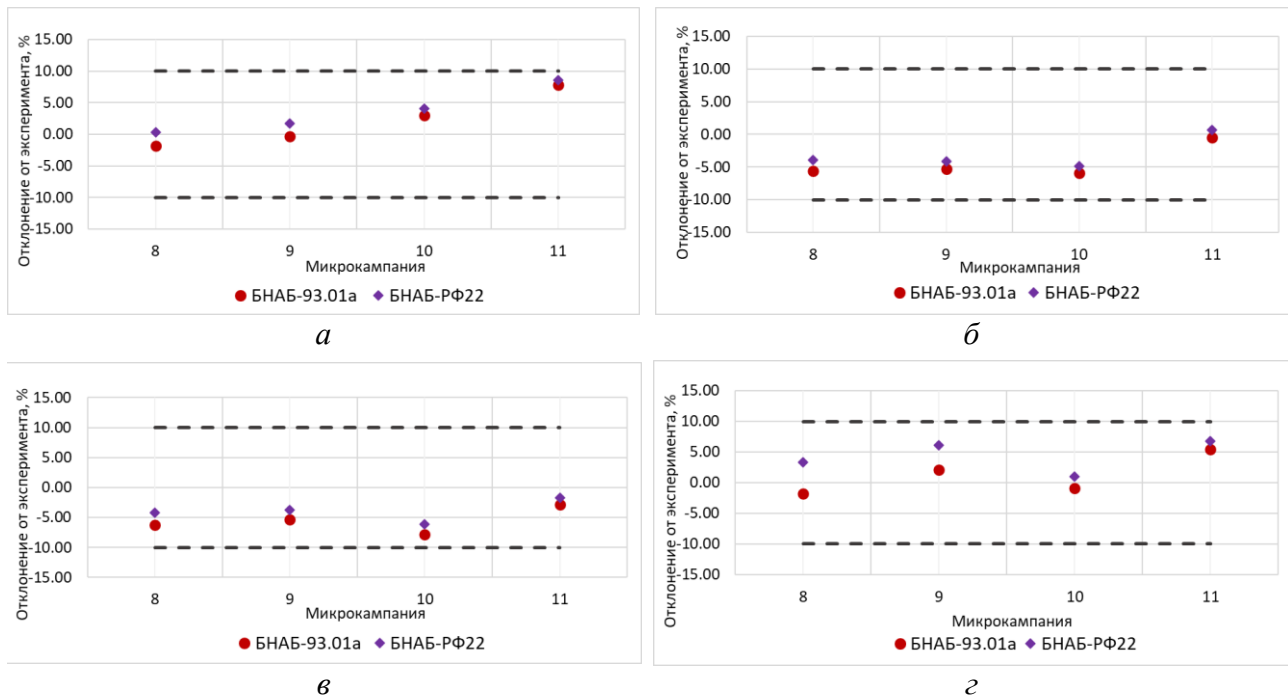


Рисунок 13 – Средние значения расчетно-экспериментальных отклонений эффективности групп стержней СУЗ: а – АЗ; б – ПАЗ; в – КС; з – РС

На рисунке 14, представлены результаты расчета темпа потери реактивности за микрокампанию для 76 микрокампании реактора БН-600 и 8 – 11 микрокампаний реактора БН-800.

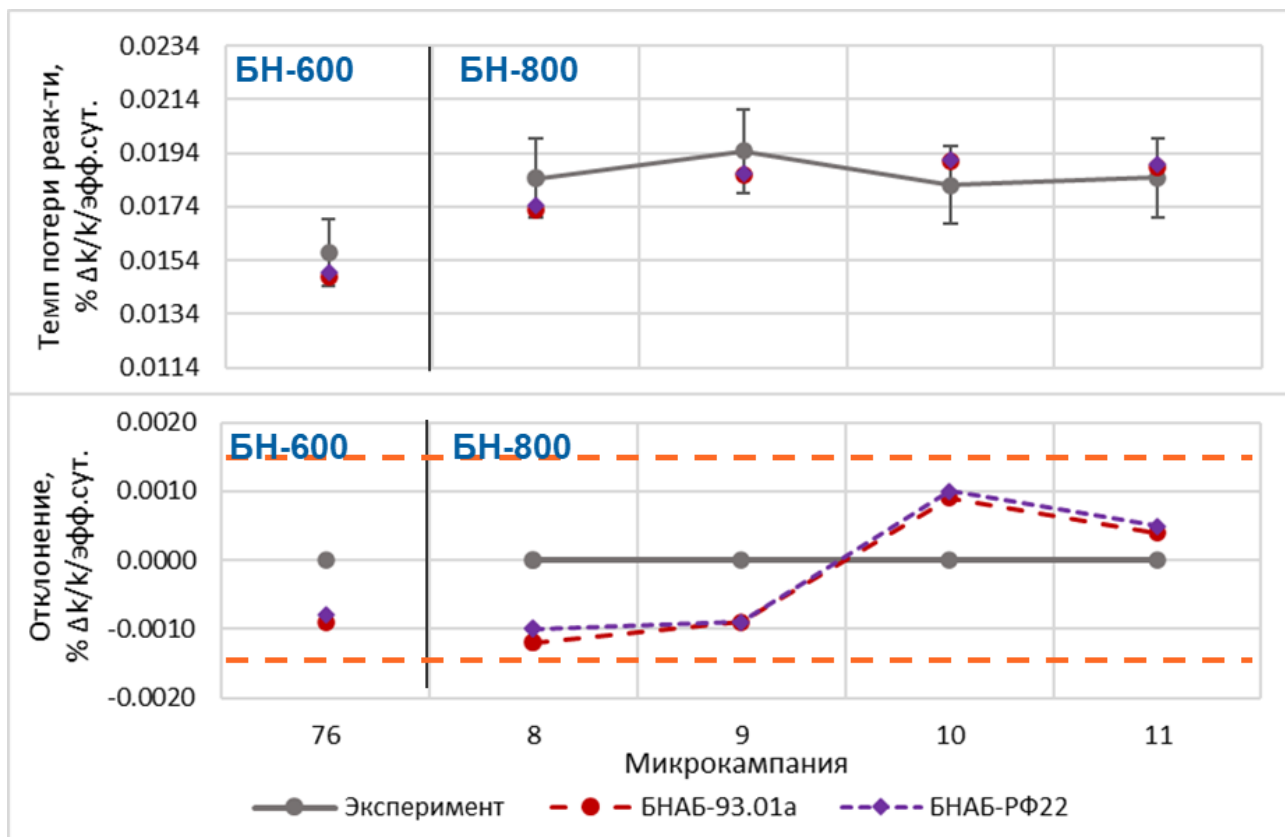


Рисунок 14 – Результаты расчета темпа потери реактивности за микрокампанию

Результаты расчетного исследования реальных состояний активных зон реакторов БН-600 и БН-800 с использованием системы CROSSER / БНАБ-РФ22 показали:

1. Использование современной версии библиотеки групповых констант БНАБ-РФ22 позволяет увеличить расчетное значение критичности примерно на +0,3 %, что, в свою очередь, снижает расчетно-экспериментальное расхождение до $\pm 0,1$ % для РУ БН-600 и РУ БН-800.

2. Результаты, полученные с использованием библиотек БНАБ-93.01а и БНАБ-РФ22, не противоречат друг другу. Полная методическая поправка диффузионного приближения составила 1,8 % для РУ БН-800 с МОКС-топливом и 1,0 % для РУ БН-600 с урановым топливом.

3. Впервые, в связи с реализацией приемственности групповых констант БНАБ-РФ22 и файлов ОЯД РОСФОНД-2.24, удалось оценить поправку, связанную с 299-групповым расчетом, которая составила +0,2 % как для БН-600, так и для БН-800.

4. Использование библиотеки констант БНАБ-РФ22 не приводит к каким-либо существенным изменениям по сравнению с БНАБ-93.01а для таких НФХ,

как: эффективность стержней СУЗ, темп потери реактивности, температурно-мощностной эффект реактивности и эффективная доля запаздывающих нейтронов.

В связи с обеспечением согласованности групповых и поточечных данных при создании БНАБ-РФ22 была выполнена оценка методической составляющей погрешности величины критичности, эффективности стержней СУЗ, и энерговыделения для РУ БН-600 и РУ БН-800.

Расчет методических поправок к $k_{эф}$ проведен по кодам TRIGEX (26 групп), ММКК (299 групп) и ММКС (детальный ход). В расчете по TRIGEX использованы опции 1 и 6 точек на кассету.

По результатам проведенных расчетов были сделаны следующие выводы для $k_{эф}$:

1) кинетическая поправка диффузионного расчета составляет около +0,5 % для РУ БН-600 и +0,7 % для РУ БН-800;

2) гетерогенная поправка составляет +0,3 % для РУ БН-600 и +0,9 % для РУ БН-800;

3) поправка на 299-групповой расчет составляет +0,2 % для РУ БН-600 и РУ БН-800;

4) полная методическая поправка диффузионного расчета составила +1,0 % для РУ БН-600 и +1,8 % для РУ БН-800.

В таблице 2 представлены обобщенные результаты расчета методических поправок к величине критичности, эффективности стержней СУЗ, и энерговыделения.

Таблица 2 – Результаты расчета методических поправок к диффузионным кодам

Функционал		Методическая поправка, %	
		БН-600	БН-800
$k_{эф}$, (на начало МК)	Кинетическая поправка	0,5	0,7
	Гетерогенная поправка	0,3	0,9
	Поправка на 299-групповой расчет	0,2	0,2
	Полная методическая поправка	1,0	1,8
Энерговыделение	По активной зоне	3	3
Эффективность РО СУЗ		10	10

На основе анализа полученных результатов можно заключить, что созданная версия библиотеки групповых констант БНАБ-РФ22 по точности не уступает проектной библиотеке БНАБ-93.01а. При этом использование новой библиотеки позволило обеспечить преемственность групповых и поточечных данных. По итогам работы БНАБ-РФ22 была адаптирована и внедрена в коды АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» и Белоярской АЭС для расчетного сопровождения РУ БН-600 и РУ БН-800. Получен Акт № 224/2.2-34/365 от 23.12.2024.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Для проведения согласованных расчетов по инженерным (диффузионным) и прецизионным кодам (с непрерывным слежением за энергией нейтрона) требовалось обеспечить преемственность групповых и поточечных данных. Эта цель достигнута путем создания и внедрения современной библиотеки групповых констант БНАБ-РФ22 в практику расчетного сопровождения реакторов БН-600 и БН-800 Белоярской АЭС.

Ниже представлены основные результаты, достигнутые по итогам выполнения диссертационной работы.

1. Создана библиотека групповых констант БНАБ-РФ22, которая:

– включает современные апробированные оценки нейтронных сечений для топливных и конструкционных материалов (файлы библиотеки РОСФОНД-2.24), а также мультигрупповые зависимости;

– обеспечивает согласованность групповых и поточечных данных при расчете нейтронно-физических параметров РУ БН-600 и РУ БН-800;

– по результатам проведенной кросс-верификации показала точность на уровне проектной библиотеки БНАБ-93.01а.

2. Для формирования и внедрения библиотеки разработан программный комплекс ИСИДА (свидетельство Роспатента № 2024685019 от 14.10.2024). Его функции:

– автоматизация создания библиотек констант в форматах ACE и БНАБ;

– обоснование применимости константных баз для нейтронно-физического расчета активных зон реакторов БН-600 и БН-800 на основе работы интегрированного системного архива результатов расчета бенчмарк-экспериментов и тестовых моделей;

– сохранение знаний и опыта работы с базами данных реакторных констант и файлов ОЯД.

Использование системного архива ПК ИСИДА позволило не только подтвердить применимость сформированной библиотеки групповых констант БНАБ-РФ22, но и упростить процесс верификации файлов и библиотек констант.

3. Для системы констант CROSSER / БНАБ-РФ22 рассчитаны методические поправки к диффузионным кодам для оценки параметра критичности, энерговыделения и эффективности ОР СУЗ:

– полная методическая поправка для расчета величины критичности составила 1,8 % для РУ БН-800 с МОКС-топливом и 1,0 % для РУ БН-600 с урановым топливом;

– методическая поправка к расчету энерговыделения не превышает 3 % в активной зоне реактора БН-600 и БН-800;

– методическая поправка к значениям эффективности РО СУЗ составила ~10 % для РУ БН-600 и РУ БН-800.

4. Библиотека БНАБ-РФ22 внедрена в практику расчетов активных зон реакторов БН-600 и БН-800 с использованием кодов TRIGEX, ММК и комплекса ГЕФЕСТ-М (Акт от 23.12.2024 № 224/2.2-34/365).

По итогам выполнения работы успешно реализована поставленная цель и решены следующие задачи:

1) создан программный комплекс ИСИДА, реализующий цикл работ с ядерными данными – от их подбора до создания групповых констант (формат БНАБ) и констант с поточечным слежением за энергией нейтрона (формат АСЕ) для применения при расчете нейтронно-физических характеристик реакторов на быстрых нейтронах;

2) обеспечена автоматизация процесса формирования групповых констант для уменьшения затраченного времени и устранения ошибок, связанных с человеческим фактором;

3) подготовлен набор библиотек по различным современным оцененным ядерным данным в формате АСЕ для проведения кросс-верификационных расчетов;

4) создан системный архив результатов расчета бенчмарк-экспериментов и тестовых моделей для проведения верификационных тестов в обоснование точности предсказания реакторных характеристик на основе отобранных или вновь созданных файлов нейтронных данных;

5) сформирована новая версия библиотеки групповых констант БНАБ-РФ22;

6) оценена методическая составляющая погрешности величины критичности, эффективности стержней СУЗ и энерговыделения при расчете по новой библиотеке групповых констант для РУ БН-600 и РУ БН-800;

7) внедрена новая версия библиотеки групповых констант в практику расчетов активных зон реакторов БН-600 и БН-800 при расчетном сопровождении эксплуатации для решения задачи согласованности констант, используемых при расчете по инженерным (диффузионным) и прецизионным (с детальным слежением за энергией нейтронов) кодам.

Таким образом, результаты работы создают прочную основу для дальнейших исследований, развития и внедрения константного обеспечения в расчетное сопровождение будущих проектов быстрых реакторов, таких как БН-1200, МБИР, БРЕСТ-ОД-300 и другие.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

1. Разработка Интерактивной Системы Использования ядерных Данных (ИСИДА) / **Д.В. Панова**, Я.В. Дьяченко, М.Ю. Семенов, А.А. Перегудов, С.В. Забродская, К.В. Тыклеева, Д.В. Дмитриев, М.Н. Слюняев, Г.Н. Мантуров, Т.П. Сокол, О.В. Супотницкая // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. — 2022. — № 3. — С. 27–38 (авторство не разделено).

2. Состояние разработки баз данных ядерных констант для расчетов быстрых реакторов на основе РОСФОНД и БНАБ-РФ / Г.Н. Мантуров, С.В. Забродская, А.А. Зуйков, Ю.В. Левченко, Н.А. Мелега, В.А. Мишин, **Д.В. Панова**, А.А. Перегудов, О.О. Перегудова, М.Ю. Семенов, М.Н. Слюняев, К.В. Тыклеева // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. — 2022. — № 3. — С. 19–26 (авторство не разделено).

3. Формирование системы групповых констант для нейтронно-физических расчетов реакторов на быстрых нейтронах на основе файлов библиотеки РОСФОНД-2020.2 / Е.П. Аверченкова, Я.В. Дьяченко, Г.Н. Мантуров, С.В. Забродская, В.А. Мишин, **Д.В. Панова**, А.А. Перегудов, М.Ю. Семенов, И.В. Тормышев, Е.П. Ляпин // Известия вузов. Ядерная энергетика. — 2024. — № 2. — С. 155–169. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.2.13> (авторство не разделено).

4. Программный комплекс ИСИДА для константного обеспечения расчетов объектов использования атомной энергетики / **Д.В. Панова**, Я.В. Дьяченко, С.В. Забродская, Г.Н. Мантуров, А.А. Перегудов, М.Ю. Семенов, Т.П. Сокол // Известия вузов. Ядерная энергетика. — 2024. — № 4. — С. 155–167. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.13> (авторство не разделено).

5. Программный комплекс ГЕФЕСТ-М / А.М. Болдырев, Е.Ф. Селезнев, Е.П. Ляпин, А.М. Тучков, С.Г. Столяров, Я.С. Гайтанов, И.Ю. Чернышов, А.А. Перегудов, М.Ю. Семенов, И.В. Тормышев, Е.П. Аверченкова, В.А. Мишин, **Д.В. Панова**, В.В. Лосев // Известия вузов. Ядерная энергетика. — 2025. — № 3. — С. 217–236. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.3.15> (авторство не разделено).

6. Верификация библиотеки констант БНАБ-РФ22 для нейтронно-физических расчетов реакторов БН-600 и БН-800 / **Д.В. Панова**, А.А. Перегудов, Г.Н. Мантуров, М.Ю. Семенов, В.А. Мишин // Известия вузов. Ядерная энергетика. — 2026. — № 1. — С. 134–147. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.1.16> (авторство не разделено).

Подписано к печати 28.05.2026. Заказ № 148.
Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 0,8. Уч.-изд. л. 1,1. Тираж 80 экз.

Отпечатано с оригинала автора в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ».
249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.