

На правах рукописи



Ломаков Глеб Борисович

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТ
ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ
РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Обнинск, 2017

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

Научный руководитель: **Мантуров Геннадий Николаевич**,
кандидат физико-математических наук,
начальник лаборатории, АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»

Официальные оппоненты: **Тихомиров Георгий Валентинович**,
доктор физико-математических наук,
заместитель директора Института ядерной
физики и технологий, НИЯУ МИФИ

Суслов Игорь Рюрикович,
кандидат физико-математических наук, главный
специалист, ЧУ ИТЦП «ПРОРЫВ»

Ведущая организация: Федеральное государственное учреждение
«Научно-технический центр по ядерной и
радиационной безопасности» (ФБУ «НТЦ ЯРБ»)

Защита состоится «18» апреля 2017 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 520.009.06 на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д.1.

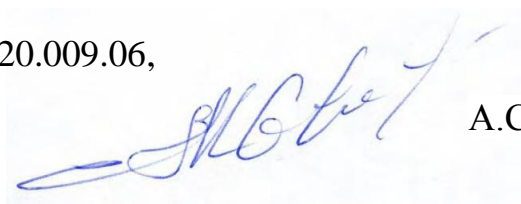
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте www.nrcki.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2017г.

Учёный секретарь

Диссертационного совета Д 520.009.06,

канд. физ.-мат. наук, доцент



А.С. Колокол

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена уточнению нейтронно-физических констант (РОСФОНД/БНАБ) в поточечном и групповом представлениях и развитию программы подготовки макроконстант (CONSYST), используемых для расчетов характеристик радиационной защиты реакторов на быстрых нейтронах.

Актуальность работы

Для создания и обеспечения надежной эксплуатации объектов ядерной техники необходимо проведение расчетов по определению пространственно-энергетического распределения нейтронного и гамма-излучений. Одной из важнейших задач является оценка радиационных условий эксплуатации несменяемых элементов конструкций реактора: корпуса, элеватора загрузки-выгрузки ТВС и др., а также оценки дозовых нагрузок на персонал в помещениях вне реактора и при работе с отработавшим ядерным топливом.

Общемировая практика расчетов радиационной защиты основывается на использовании групповых констант, при этом точность рассчитываемых функционалов зависит от целого ряда неопределенностей и погрешностей, накапливающихся на каждом этапе формирования нейтронно-физических констант: от оценки экспериментальных данных до усреднения применяемых в расчете групповых сечений. Использование группового приближения оправдано при выполнении серийных и инженерных расчетов, если потеря точности, обусловленная групповым приближением не приводит к большим погрешностям в оцениваемом функционале.

Поэтому актуальной задачей является минимизация константной погрешности, которая возможна за счет формирования групповых библиотек нейтронно-физических констант без потери точности рассчитываемых функционалов при переработке библиотек оцененных ядерных данных (ОЯД), соответствующих современному мировому уровню знаний.

Степень разработанности проблемы исследования

Опыт создания и развития библиотек нейтронно-физических констант в течении почти полувека показывает, что на сегодняшний день не достигнут конечный результат – универсальная библиотека, полностью удовлетворяющая текущим потребностям ядерных технологий в нейтронных данных. В настоящее время, в рамках международного проекта CIELO (Collaborative International Evaluated Library Organisation), в 2013-2018 годах, колаборацией ведущих мировых специалистов по оценке ядерных данных планируется выработать единые файлы для шести основных реакторных нуклидов: ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{56}Fe , ^{16}O и ^1H . Обновляются национальные библиотеки ОЯД БРОНД-3.1 (2016), РОСФОНД (2010), ENDF/B-VII.1 (2011), JENDL-4.0 (2012), JEFF-3.2 (2014), TENDL (2014, 2015) и др., готовится к выходу библиотека ENDF/B-VIII (2017). Все это говорит об актуализации и необходимости дальнейшего продолжения работ с целью повышения точности нейтронно-физических констант. При этом основным источником информации о взаимодействии нейтронов с материалами является дифференциальные эксперименты.

В 1960-х и 1980-х годах в ГНЦ РФ-ФЭИ (Обнинск, Россия) были выполнены эксперименты, направленные на исследование свойств конструкционных материалов при прохождении реакторного излучения сквозь слои материалов различной толщины. По результатам этих экспериментов были получены данные, которые легли в основу библиотек групповых констант БНАБ (-64, -78 и -93). Но информация, заложенная в этих экспериментах, не была извлечена полностью. При современном уровне вычислительных мощностей появилась возможность пересмотра этой экспериментальной информации для верификации и валидации библиотек ОЯД и программ переработки нейтронно-физических констант.

В настоящей работе исследуются свойства важных реакторных материалов и анализируются существующие эксперименты по измерению функции пропускания реакторного излучения через слои материалов

различной толщины (для свинца, железа, кремния и ниобия), которые позволяют выявить недостатки в описании сечений взаимодействия нейтронов и гамма-квантов или подтвердить надежность существующих нейтронно-физических констант.

С обновлением файлов библиотек ОЯД развиваются и программы-переработчики (процессинговые коды) этой информации из формата ENDF-6 в поточечные и групповые данные для дальнейшего использования в нейтронно-физических кодах. Зарубежные коды NJOY2012 (LANL, USA), AMPX-2000 (ORNL, USA) и отечественный код GRUCON, последняя версия которого вышла в 2015 году.

Системы групповых констант также обновляются, находясь в тесной связке с библиотеками ОЯД. В нашей стране существует система групповых констант CONSYST/БНАБ (ГНЦ РФ-ФЭИ), последняя версия которой основана на файлах библиотеки РОСФОНД. Зарубежными аналогами являются TRANSX/MATXS (LANL, USA), а также системы групповых констант BUGLE/VITAMIN и SCALE (ORNL, USA).

В данной работе показано, что анализ ранее неучтенных экспериментов по измерению функции пропускания реакторного излучения через слои материалов различной толщины (для свинца, железа, кремния и ниобия) и минимизация расчетных расхождений оцениваемых функционалов, полученных с использованием групповых и поточечных библиотек констант, позволяет повысить точность нейтронно-физических констант.

Цель и задачи исследования

Целью работы является уточнение нейтронно-физических констант в быстрой области энергий и их верификация в расчетах экспериментов по радиационной защите реакторов на быстрых нейтронах. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи.

- Выполнен анализ дифференциальных экспериментов и валидация нейтронно-физических констант для конструкционных материалов.

- Получены оценки нейтронных резонансов для библиотеки РОСФОНД на основании анализа дифференциальных экспериментов в быстрой области энергий.
- Предложен и реализован новый алгоритм подготовки микросечений для системы групповых констант БНАБ в части формирования матриц рассеяния и образования вторичных гамма-квантов.
- Расширен набор выходных форматов программы подготовки констант CONSYST для адаптации её под новые инженерные коды.
- Выполнена верификация нейтронно-физических констант в расчетах экспериментов по радиационной защите реакторов на быстрых нейтронах из международных справочников бенчмарк-экспериментов.

Научная новизна работы

- Впервые выполнена оценка погрешности группового приближения при расчетном моделировании экспериментов по радиационной защите реакторов на быстрых нейтронах (при ослаблении потока частиц в 10^4 раз), предельное значение которой не превышает 5 %.
- Впервые предложен и реализован новый алгоритм подготовки микро и макроконстант для системы CONSYST/БНАБ.
- Впервые выполнена прецизионная оценка экспериментов по пропусканию нейтронов через толстые образцы реакторных материалов (кремния и ниобия).
- Получена новая оценка нейтронных констант на основании оцененных экспериментов для кремния и ниобия.

Практическая значимость

- Обосновано использование системы констант БНАБ для расчетного моделирования радиационной защиты быстрых реакторов с прецизионной точностью на основании анализа результатов расчета бенчмарк-экспериментов из международной базы данных.

- Адаптированное константное обеспечение БНАБ является составной частью проектных кодов АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС».
- Созданы согласованные расчетные задания для валидации нейтронных данных библиотек ОЯД для реакторных материалов (кремния и ниобия).
- Российская библиотека ОЯД РОСФОНД дополнена уточненными данными по нейтронным константам кремния и ниобия.
- Библиотеки ОЯД РОСФОНД и библиотека групповых констант БНАБ были использованы при выполнении государственных контрактов и федеральных целевых программ.
- Получены свидетельства о государственной регистрации базы данных и программы для ЭВМ на отдельные компоненты системы групповых констант CONSYST/БНАБ.

Личный вклад автора заключается

- в непосредственном выполнении всех этапов работы, а именно оценке экспериментов по пропусканию нейтронов через толстые образцы реакторных материалов для кремния и ниобия, начиная от оцифровки и систематизации данных из журналов измерений, их обработки, составления расчетных моделей до оценки экспериментов и уточнения данных нейтронных резонансов;
- в выполнении работ по расширению форматов представления констант и корректировке алгоритмов получения данных библиотеки БНАБ;
- в разработке расширенной версии системы подготовки констант CONSYST/GNDL в части формирования микро- и макроконстант;
- в выполнении, в соавторстве с коллегами, работ по верификации системы константного обеспечения в расчетах нейтронно-физических функционалов активной зоны и радиационной защиты;
- в представлении и обсуждении результатов на международных и Российских научных мероприятиях, подготовке публикаций и докладов.

Достоверность и обоснованность результатов работы

Основная часть представленных расчетных величин получена с использованием прецизионного кода MCNP в расчетах как с детальным слежением за энергией частиц, так и в групповом приближении. Все используемые в работе расчетные модели интегральных экспериментов созданы на основании информации из международных справочников по критической безопасности (ICSBEP) и баз данных экспериментов по радиационной защите (SINBAD). Обоснованность научных положений достигается за счет использования зарекомендовавших себя моделей и подходов, нашедших широкий отклик в отечественных и зарубежных публикациях.

Основные положения, выносимые на защиту

- Новые данные по матрицам рассеяния нейтронов и образования вторичных гамма-квантов для групповой библиотеки БНАБ.
- Расширенная версия системы подготовки групповых микро- и макроконстант CONSYST/GNDL.
- Результаты верификации системы групповых констант CONSYST/БНАБ в расчетах нейтронно-физических характеристик экспериментов по радиационной защите реакторов на быстрых нейтронах.
- Результаты анализа экспериментов по исследованию свойств конструкционных материалов (железо, свинец, кремний и ниобий) при прохождении ИИ сквозь защитные материалы различной толщины.
- Новая оценка нейтронных констант для кремния и ниобия в области энергии 300 - 800 и 7 – 600 кэВ, соответственно.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих российских и международных научных мероприятиях.

- XVI семинар по проблемам физики реакторов «Волга-2010» в 2010 г. (Тверская обл., Россия).
- Научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» (НЕЙТРОНИКА) в 2010, 2011, 2013, 2015 и 2016 гг. (г. Обнинск, Россия).
- Научная сессия НИЯУ МИФИ-2012 (г. Обнинск, Россия).
- Международная конференция по радиационной защите «ICRS-12 & RPSD-2012» в 2012 г. (г. Нара, Япония).
- Международная конференция по ядерным данным «ND2013» в 2013 г. (г. Нью-Йорк, США) и «ND 2016» в 2016 г. (г. Брюгге, Бельгия).
- 10-я Юбилейная Российская научная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях» в 2015 г. (г. Обнинск – Москва, Россия).
- 22 международный ежегодный семинар «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ» в 2015 г. (г. Обнинск, Россия).
- Международная конференция по физике реакторов «PHYSOR2016» в 2016 г. (г. Сан Валли, США).

Публикации

Основной материал диссертации представлен в 18-ти работах, в том числе в 8 статьях опубликованных в профильных научных изданиях, из которых 3 входят в перечень рецензируемых научных изданий ВАК, 2 проиндексированы в международной базе данных Scopus; 9 публикаций в сборниках тезисов и докладов международных и Российских конференций; имеется свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 145 наименований и 6 приложений. Работа изложена на 139 страницах, содержит 41 иллюстрацию и 8 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность рассматриваемой темы, сформулирована цель и определены основные решаемые задачи. Приведены положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна работы и практическая значимость диссертации.

В **первой главе** приводится анализ дифференциальных экспериментов и валидация нейтронно-физических констант конструкционных элементов. Рассмотрены бенчмарк-эксперименты по исследованию нейтронного и фотонного спектров утечки с железных (ALARM-CF-FE-SHIELD-001) и свинцовых (ALARM-CF-PB-SHIELD-001) сфер различного радиуса (от 10 до 35 см) с калифорниевым источником в центре (рис. 1), направленные на исследование захватного взаимодействия и рассеяния нейтронов, а также образования вторичных гамма-квантов. Также рассмотрены эксперименты по измерению функций пропускания нейтронов через слои материалов различной толщины для железа (FUND-IPPE-VDG-MULT-

TRANS-001), кремния и ниобия (рис. 2), направленные на исследование резонансной структуры полного сечения нейтронов.

Два типа описанных выше

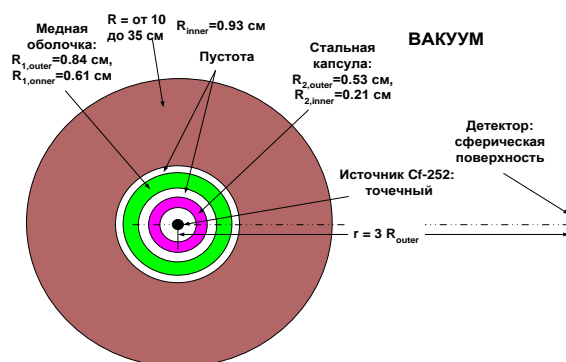


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки по исследованию нейтронного и фотонного спектров утечки с железных и свинцовых сфер (не в масштабе)

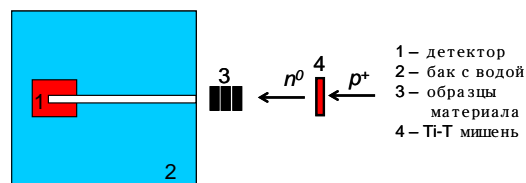


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки по измерению функции пропускания нейтронов (не в масштабе)

экспериментов представляют собой исследование прохождения реакторных частиц через различные толщины материалов, как в сферической, так и в плоской геометрии. Широкий набор, указанных выше, исследуемых величин позволяет охватить основные типы взаимодействий излучения с важными реакторными материалами в быстрой области энергий.

Детальный расчетный анализ экспериментов по пропусканию нейтронов в сферической геометрии показывает, что в нейтронном спектре достаточно хорошее согласие экспериментальных и расчетных величин, выполненных с использованием последних версий библиотек ОЯД как для железных (рис. 3а), так и для свинцовых (рис. 3в) сфер. Это говорит о достаточно надежных данных по рассеянию и захвату нейтронов на исследуемых материалах.

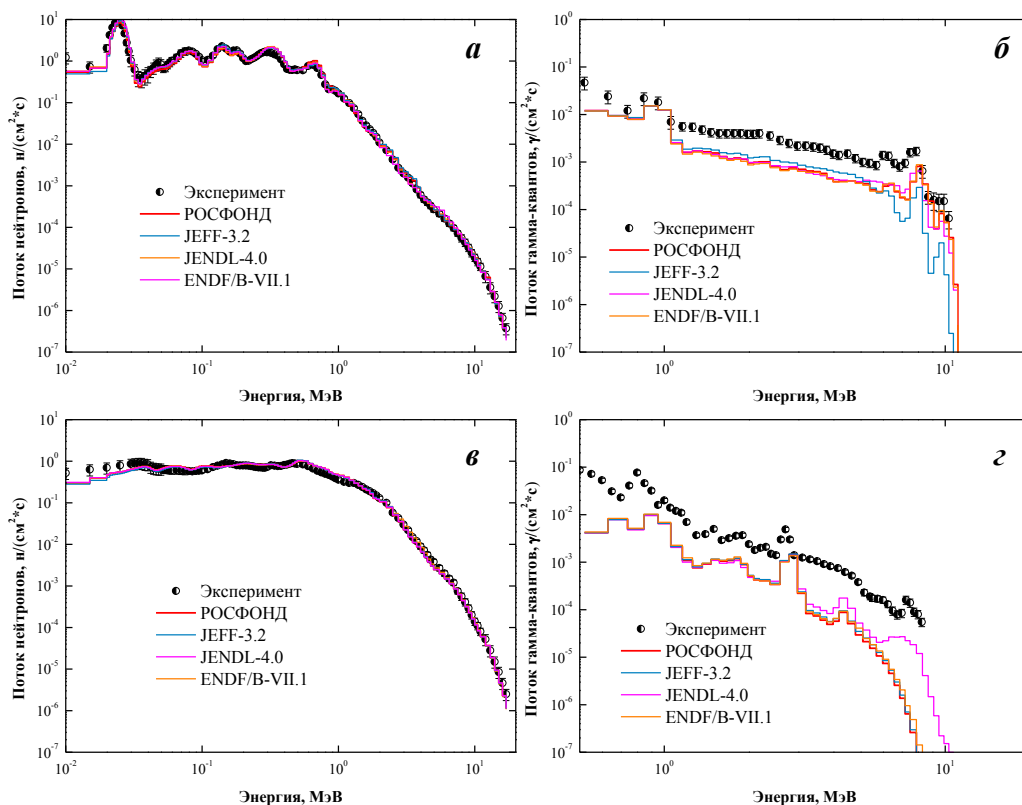


Рисунок 3 – Сравнение экспериментальных и расчетных спектров утечки нейтронов (а и в) и гамма-квантов (б и г) с поверхности железной (радиус 35 см) (а и б) и свинцовой (радиус 30 см) (в и г) сфер

Анализ спектра утечки гамма-квантов демонстрирует, что при увеличении радиуса защитной сферы доля вторичных гамма-квантов начинает преобладать над первичным излучением источника. Так,

результаты расчета спектра утечки гамма-квантов с железной сферы радиусом 35 см (рис. 3б) и свинцовой сферы радиусом 30 см (рис. 3г) при использовании последних версий библиотек ОЯД показали сильное расхождение с экспериментальными величинами. Причиной такого расхождения могут быть как недостаточно корректное описание выходов гамма-квантов в результате нейтронных реакций, так и недостаточная детализация условий проведения эксперимента. Для окончательной рекомендации по корректировке выходов вторичных гамма-квантов необходимо привлечение дополнительных экспериментальных данных.

Анализ экспериментов по пропусканию нейтронов в плоской геометрии в области энергий от 1 до 400 кэВ на железе показал удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных величин (рис. 4).

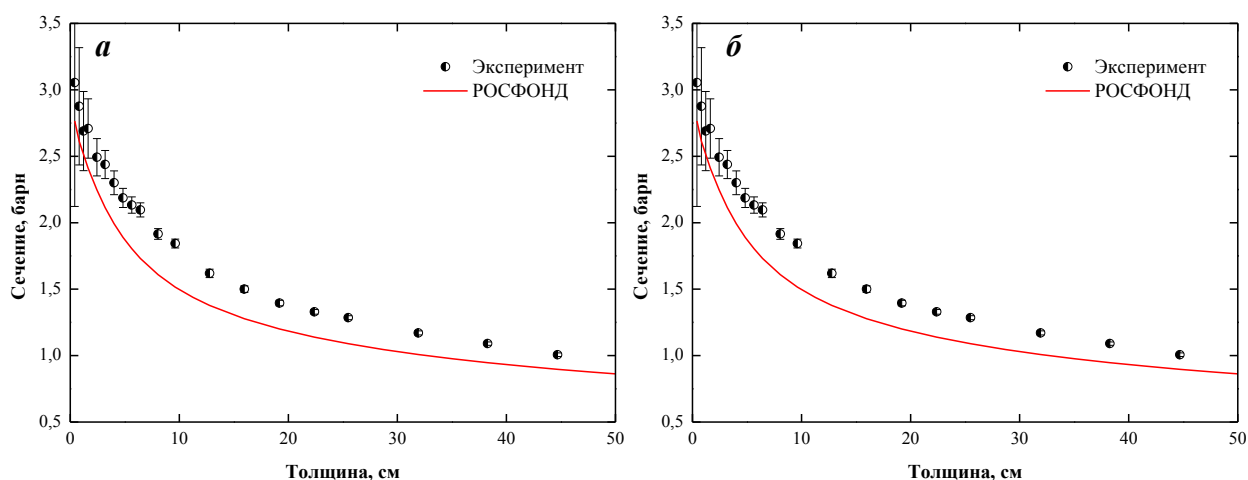


Рисунок 4 – Сравнение экспериментальных и расчетных эффективных сечений железа в области энергий 146 – 187 кэВ (а) и 339 – 366 кэВ (б)

Для материалов кремния и ниобия была выполнена прецизионная оценка экспериментов по пропусканию нейтронов и выявлены расчетно-экспериментальные расхождения. В результате анализа экспериментальной информации и валидации библиотек ОЯД было выявлено, что расчетные и экспериментальные величины имеют расхождение в области 300-800 кэВ (рис. 5а) для кремния. В последних версиях библиотек ОЯД для природной смеси кремния резонанс в области 700 кэВ отсутствует, однако присутствует в ранних версиях библиотеки JEFF-2.2 (рис. 5б, выделено красным овалом).

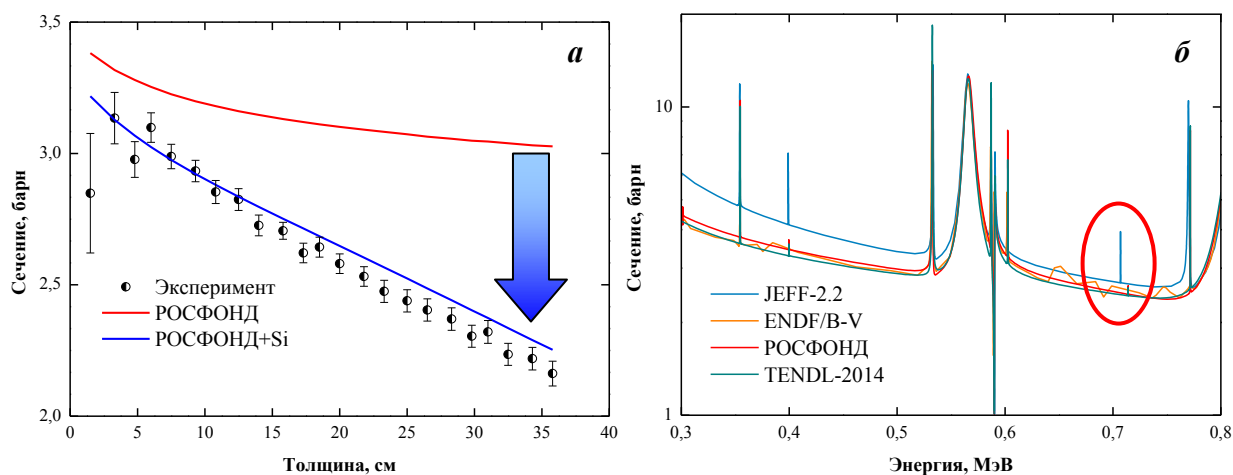


Рисунок 5 – Сравнение экспериментальных и расчетных эффективных сечений кремния в области энергий 390 – 700 кэВ (а) и хода полного сечения нейтронов в библиотеках ОЯД в области энергий 300 – 800 кэВ (б)

Такая информация свидетельствует о необходимости уточнения описания резонансной структуры кремния в указанной области энергий.

При сопоставлении экспериментальных данных по ниобию в области энергий 7 – 600 кэВ, расчетных результатов других авторов и расчетных данных, полученных с использованием библиотеки РОСФОНД (рис. 6а) выявлена необходимость уточнения резонансной структуры нейтронного сечения в диапазоне энергий 7 – 600 кэВ (рис. 6б).

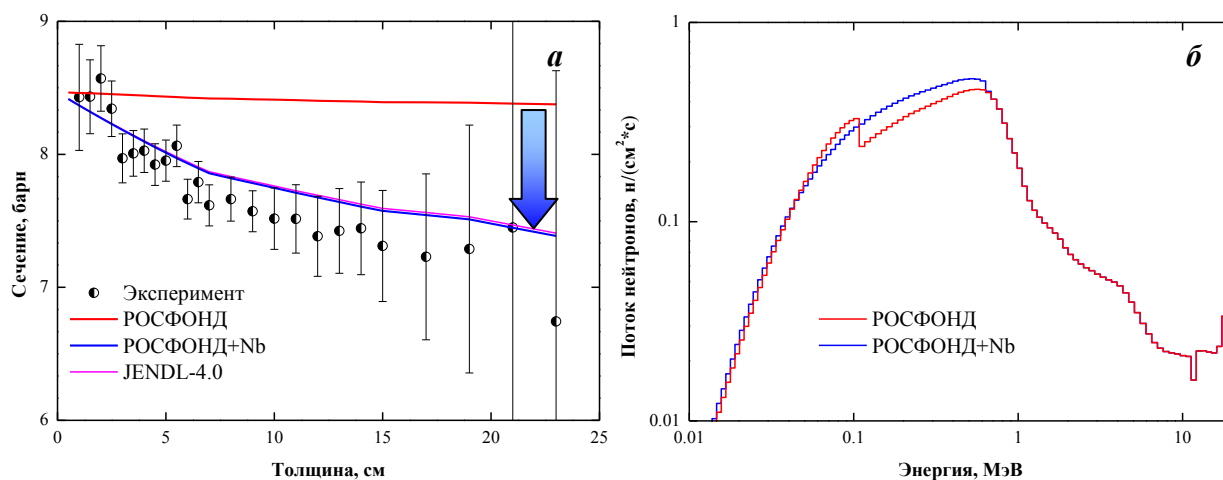


Рисунок 6 – Расчетно-экспериментальное расхождение эффективного сечения ниобия в области энергий 320 – 650 кэВ (а) и сравнение теоретических расчетов нейтронного спектра с использованием разного описания резонансной структуры нейтронного сечения* (б)

* Ch. Konno et al. Self-shielding effect of unresolved resonance data in JENDL-4.0. *Progress in Nuclear Science and Technology*. Volume 4 (2014) pp. 606-609.

Полученные результаты валидации библиотек ОЯД свидетельствуют о необходимости повышения точности описания резонансной структуры полного сечения кремния и ниобия.

Во **второй главе** представлены результаты работы по повышению точности определения нейтронно-физических констант на основе анализа дифференциальных экспериментов. Выполнен обзор современного состояния библиотек ОЯД кремния и ниобия в указанных выше областях энергий и рассмотрены методы корректировки резонансных параметров файлов ОЯД.

В последних версиях библиотек ОЯД для ^{28}Si содержится область разрешенных резонансов до 1,75 МэВ. Для ниобия, практически во всех библиотеках, область разрешенных резонансов заканчивается в районе 7 кэВ, в TENDL-2014 в районе 10 кэВ. Верхняя граница области неразрешенных резонансов у всех библиотек разная: 30 кэВ (TENDL-2014), 50 кэВ (БРОНД-2.2), 100 кэВ (РОСФОНД и JENDL-3.3) и 600 кэВ (JENDL-4.0). В некоторых библиотеках отсутствует область неразрешенных резонансов (ENDF/B-VII.01 и JEFF-3.2).

Формирование новых оценок нейтронно-физических констант для исследуемых материалов выполнено на основе методов и программ, позволяющих получить новые резонансные параметры согласно выявленным расчетно-экспериментальным расхождениям, сводя эти расхождения к минимуму. Данные для модификации были взяты из библиотеки ОЯД РОСФОНД, рекомендованной для проведения верификации и аттестации кодов для расчета пространственно-энергетического распределения нейтронов и гамма-квантов (РБ 061-11).

Корректировка констант кремния выполнена методом стохастической оптимизации, позволившим получить согласованный набор нейтронных данных для описания экспериментальной информации. Основа данного подхода – метод Монте-Карло (многовариантные расчеты), когда из набора возможных вариантов отбираются данные, отвечающие статистическим критериям, и наиболее близко описывающие экспериментальные

зависимости. Данный подход широко используется для корректировки детального хода сечений на основе интегральных экспериментов, например, программа TALYS статистической обработки и получения резонансных параметров и файлов ядерных данных для библиотеки ОЯД TENDL.

Чтобы описать экспериментальную информацию (рис. 5а, показано стрелкой) для кремния потребовалось добавить в файл ^{28}Si резонанс в области энергий 700 кэВ с помощью метода, описанного выше. Свидетельства о наблюдениях резонанса при этой энергии (но малым по величине) есть в измерениях детального полного сечения на 80-ти метровой пролетной базе ORELA (ORNL, США) выполненные под руководством D.C. Larson. В ранних версиях библиотеки ОЯД JEFF-2.2 в оценках полного сечения естественной смеси кремния данный резонанс присутствует, впоследствии, в более поздних версиях оценок, он был пропущен (рис. 5б).

В неразрешенной резонансной области энергий используются средние резонансные параметры для описания плохо выявляемой резонансной структуры материалов. Программа EVPAR позволяет сформировать и записать в формат ENDF-6 средние резонансные параметры, полученные по входным данным с использованием экспериментальных функций пропускания нейтронов в указанной энергетической области энергии (рис. 6а, показано стрелкой).

Полученные новые оценки нейтронно-физических констант для кремния и ниобия в области энергии 300 - 800 и 7 – 600 кэВ, соответственно, дополнили новую версию библиотеки ОЯД РОСФОНД.

В качестве тестирования новых, уточненных, данных были посчитаны кремниевые и ниобиевый бенчмарк-эксперименты из международного справочника ICSBER.

Эксперименты по моделированию геологических хранилищ отработавшего уранового и плутониевого топлива, выполненные на стенде БФС в начале 2000-х годов, содержатся в международном справочнике ICSBER (HEU-MET-MIXED-005 и PU-MET-MIXED-001). Результаты

расчетов спектральных индексов по прецизионной модели с использованием поточечного представления констант с оригинальными и модифицированными файлами ^{28}Si приведены в таблице 1, из которой следует, что внесенные изменения уменьшают расчетно-экспериментальные расхождения в скоростях реакций и в эффективном коэффициенте размножения нейтронов (рис. 7).

Таблица 1 – Расчетно-экспериментальные расхождения характеристик критических сборок БФС, полученных с использованием оригинальных и модифицированных данных кремния

| Индекс | Эксперимент | ОЯД | Расчет/Эксп.–1, % |
|--|-----------------|--------------|-------------------|
| БФС-79-5 | | | |
| $\sigma_f(^{238}\text{U}) / \sigma_f(^{235}\text{U})$ | 0,0150 ± 0,005 | РОСФОНД | 6,7 ± 3,8 |
| | | РОСФОНД + Si | 5,3 ± 3,8 |
| $\sigma_c(^{197}\text{Au}) / \sigma_f(^{235}\text{U})$ | 1,15 ± 0,05 | РОСФОНД | -21,7 ± 4,9 |
| | | РОСФОНД + Si | -2,6 ± 4,7 |
| БФС-81-1 | | | |
| $\sigma_f(^{238}\text{U}) / \sigma_f(^{235}\text{U})$ | 0,0168 ± 0,0005 | РОСФОНД | 3,5 ± 3,2 |
| | | РОСФОНД + Si | 2,0 ± 3,1 |
| $\sigma_c(^{197}\text{Au}) / \sigma_f(^{235}\text{U})$ | 1,11 ± 0,05 | РОСФОНД | 2,5 ± 4,2 |
| | | РОСФОНД + Si | -0,2 ± 4,0 |

На рисунке 7 приведены результаты расчета критичности указанных моделей с использованием оригинального и модифицированного файла кремния в библиотеке РОСФОНД, из которых следует уменьшение расчетно-экспериментальных расхождений при использовании модифицированных данных.

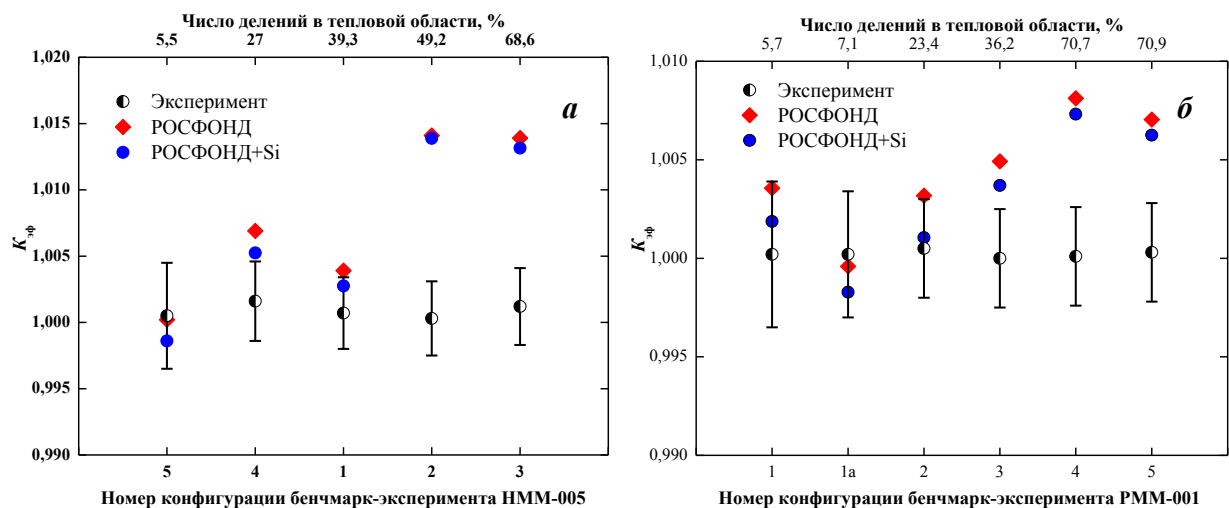


Рисунок 7 – Сравнение результатов расчета критичности, с использованием оригинальных и модифицированных нейтронно-физических констант кремния, с экспериментом

Также в справочнике содержится бенчмарк-эксперимент по исследованию чувствительности $K_{эф}$ к ниобию в смягченном спектре

нейтронов, который может наблюдаться в случае, если космический ядерный реактор с быстрым спектром заполнится водой (HEU-MET-FAST-047). В таблице 2 приведены результаты расчетов данной прецизионной модели с использованием оригинального и измененного файла ниобия библиотеки РОСФОНД, которые свидетельствуют об уменьшении расчетно-экспериментальных расхождений вследствие вносимых изменений.

Таблица 2 – Сравнение $K_{эф}$ сборки НМФ047, полученных с использованием оригинального и модифицированного файла ниобия библиотеки РОСФОНД

| | Эксперимент | РОСФОНД | РОСФОНД+Nb |
|----------|--------------------|-----------------|-------------------|
| $K_{эф}$ | 1,0007±0,0037 | 1,00497±0,00025 | 1,00198±0,00026 |

Из полученных выше расчетно-экспериментальных расхождений видно, что использование новых оценок нейтронно-физических констант для кремния и ниобия повышает точность расчетных предсказаний.

Третья глава посвящена описанию развития системы групповых нейтронно-физических констант БНАБ для расчетов защиты. Приводится краткое описание форматов представления констант российской и зарубежных библиотек, описывается методика получения групповых микроконстант и программ подготовки констант.

Система групповых констант состоит из библиотеки микроконстант (БНАБ) и системы подготовки заблокированных макроконстант (CONSYST) для нейтронно-физических расчетов. В настоящей работе были усовершенствованы обе составляющих.

Для проверки алгоритмов подготовки групповых констант отечественной системы была сформирована библиотека микроконстант в формате MATXS на основе библиотеки ОЯД РОСФОНД для 385 нуклидов. Верификация полученной библиотеки с имеющейся системой групповых констант БНАБ в расчетах простейших бенчмарк-моделей позволила выявить и устранить неточности в формировании матриц рассеяния (рис. 8а и 8в). Для всего набора материалов библиотеки БНАБ (около 400) получены новые матрицы рассеяния (рис. 8б и 8г).

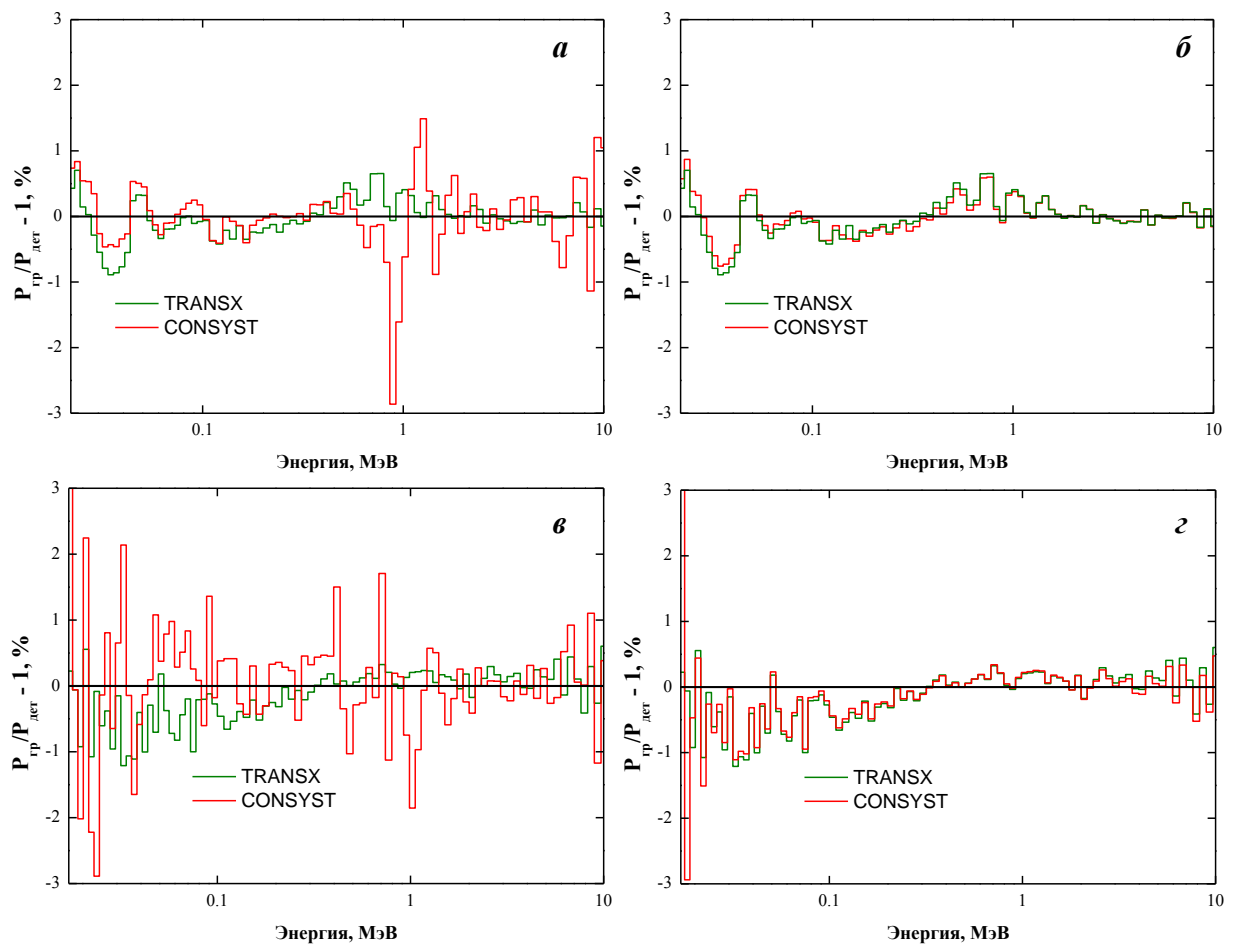


Рисунок 8 – Отклонение потоков нейтронов в бенчмарк-моделях SCHERZO-5.56 (*а* и *б*) и FLATTOP-25 (*в* и *г*), полученных по программам подготовки макроконстант CONSYST и TRANSX от поточечного расчета по MCNP

При сравнении результатов расчетов спектров нейтронов и гамма-квантов выявлены недостатки в алгоритме подготовки матриц образования вторичных гамма-квантов (рис. 9*а*), которые были устранены для всего набора (около 150) материалов библиотеки БНАБ (рис. 9*б*).

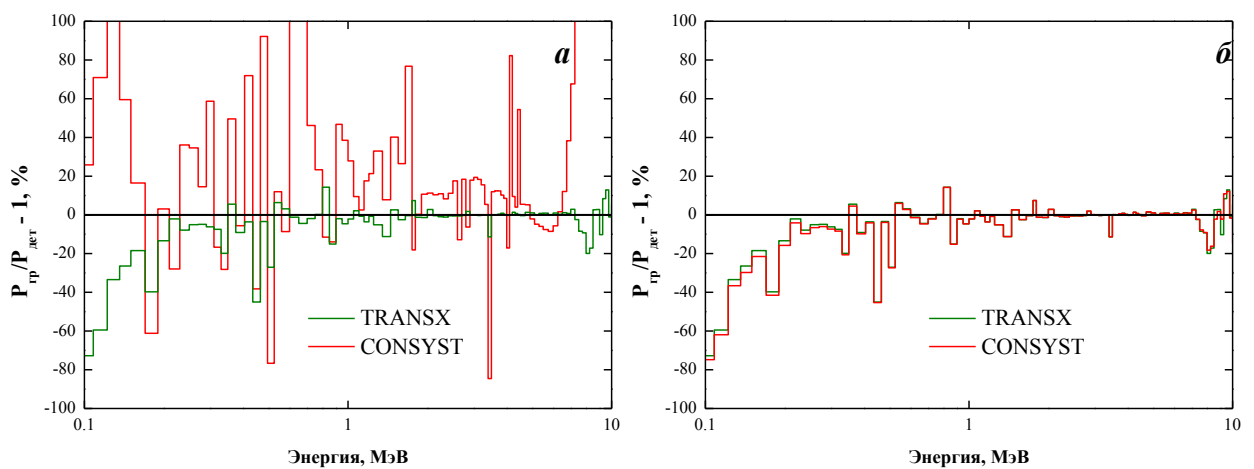


Рисунок 9 – Отклонение спектров вторичных гамма-квантов, образованных первой нейтронной группой в ^{208}Pb , полученных по программам подготовки макроконстант CONSYST и TRANSX от поточечного расчета по MCNP

Система подготовки констант CONSYST дополнена возможностью получать константы в GNDL-формате по-группового и по-материального представления блокированных микро- и макроконстант для широкого спектра нейтронных взаимодействий и ядерных характеристик, хранимых в библиотеке БНАБ в разделе MF=9.

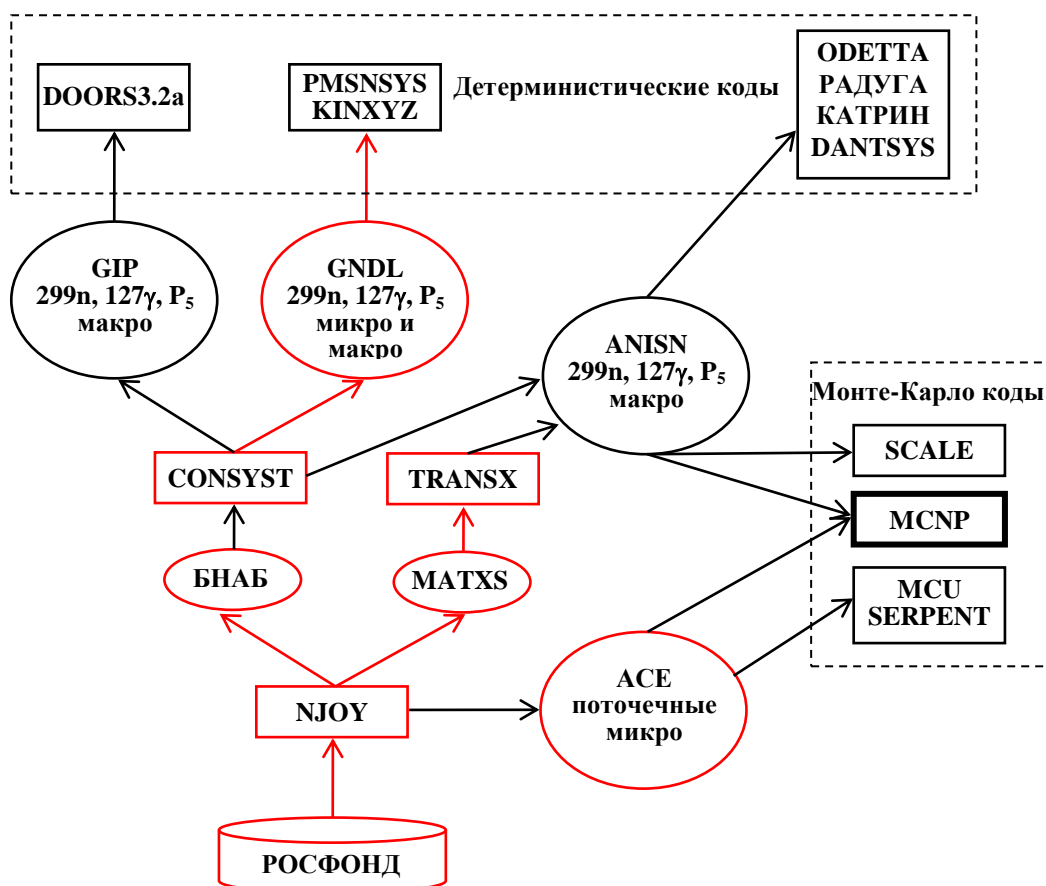


Рисунок 10 – Схема использования константного обеспечения БНАБ

В ходе выполнения данной работы протестирована и приведена в соответствие с форматом хранимая информация. Данное нововведение позволило расширить список расчетных нейтронно-физических кодов, использующих систему БНАБ (рис. 10, красным выделены программы и библиотеки, используемые и уточненные в настоящей диссертационной работе).

Тестирование нового формата записи микро- и макроконстант выполнено на международном тесте гибридной активной зоны БН-600 с расчетом эффективной доли запаздывающих нейтронов (табл. 3) для проверки работоспособности микроконстант, расчетом падения реактивности

(табл. 4) и энерговыделения (рис. 11) для проверки работоспособности макроконстант. Расчеты выполнены по программе PMSNSYS.

Таблица 3 – Расчет эффективной доли запаздывающих нейтронов

| Эффективная доля запаздывающих нейтронов | |
|--|----------|
| Настоящая работа | 5,83E-03 |
| Бенчмарк | 5,83E-03 |

Таблица 4 – Расчет падения реактивности с различными параметрами

| Приближение | S8P1 | S16P3 | бенчмарк |
|----------------------|--------|--------|---------------|
| $K_{эф}$ ВОС | 1,0185 | 1,0189 | 1,0101±0,0101 |
| $K_{эф}$ ЕОС | 0,9932 | 0,9936 | 0,9909±0,0055 |
| Падение реактивности | 0,0250 | 0,0251 | 0,0251±0,0010 |

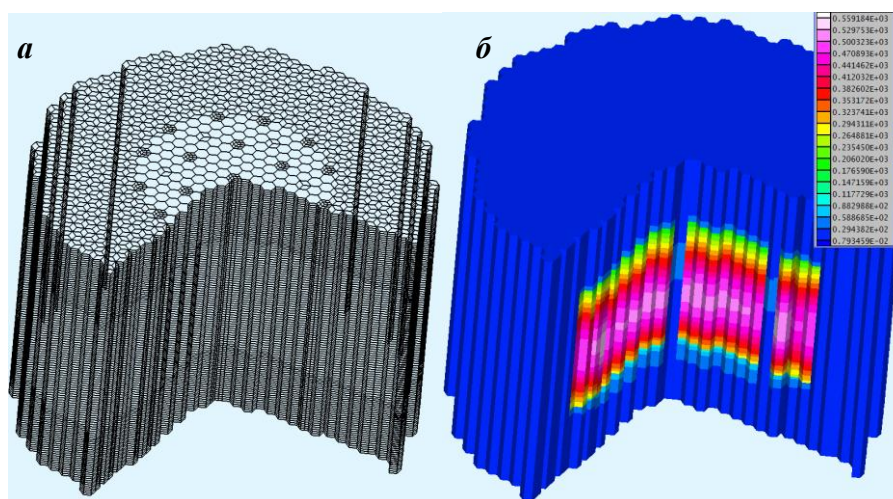


Рисунок 11 – БН-600 – расчетная сетка (а) и поле энерговыделения Вт/см³ (б)

Результаты расчетов демонстрируют хорошее согласие расчетных и экспериментальных величин, что говорит о корректности получаемых микро- и макроконстант в формате GNDL.

В **четвертой главе** выполнена верификация групповой системы констант БНАБ в расчетах (по программе MCNP, использующей метод Монте-Карло) нейтронно-физических характеристик экспериментов по радиационной защите реакторов на быстрых нейтронах.

Для верификации групповых констант в расчетах нейтронных и гамма полей из международного справочника эталонных критических экспериментов ICSBER были выбраны железные и свинцовые сферы

различного радиуса с калифорниевым источником в центре (рис. 12). Для групповых расчетов были подготовлены макроскопические блокированные сечения с помощью программ CONSYST и TRANSX. Результаты расчета с использованием системы групповых констант БНАБ показывают хорошее согласие нейтронного и фотонного спектров с результатами прецизионных расчетов, использующих поточечное представление сечений на защитных бенчмарк-моделях, благодаря повышению точности хранимой групповой информации.

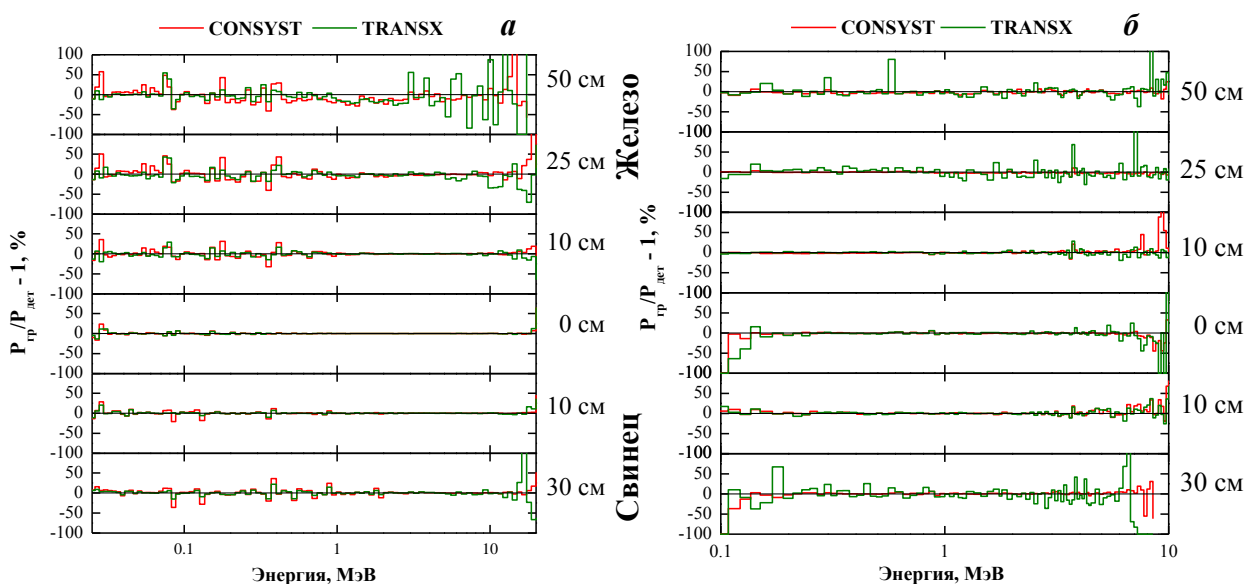


Рисунок 12 — Различие спектра нейтронов (а) и фотонов (б) с поверхности железных (сверху) и свинцовых (снизу) сфер групповых (БНАБ) и детальных расчетов (библиотеки ОЯД РОСФОНД)

В базе данных защитных экспериментов SINBAD содержится описание экспериментальной установки JASPER с широким набором конфигураций, направленных на исследование защитных свойств материалов быстрых реакторов с натриевым теплоносителем, а также содержит конфигурацию для исследования нейтронного потока в промежуточном теплообменнике. Для верификации были отобраны несколько конфигураций:

1. Исследование потока нейтронов после бокового уранового blankets без защиты – конфигурация IA.
2. Исследование потока нейтронов после 10 см стальной и 6 см защитой карбида бора за боковым урановым blankets – конфигурация IIIВ.

3. Исследование потока нейтронов в промежуточном теплообменнике реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем после 2 м слоя натрия – конфигурация VC.

С увеличением радиуса сферы Боннера (детектор в эксперимента JASPER) изменяется чувствительность от теплового к быстрому спектру. В таблице 5 приведены результаты расчетов эксперимента JASPER по программе MCNP с поточечным и групповым представлениями констант. Для решения задач с глубоким прохождением нейтронов через слои материалов при больших ослаблениях потока использовалось неаналоговое моделирование для понижения дисперсии получаемых функционалов.

Таблица 5 – Отношение результатов расчетов, с использованием группового и детального представления сечений, для некоторых конфигураций эксперимента JASPER

| Ослабление потока, раз | Сфера Боннера, см | БНАБ/РОСФОНД | | | |
|------------------------|-------------------|--------------|-------|-------|-------|
| | | 7,6 | 12,7 | 19,9 | 25,0 |
| 10^2 | IA | 0,993 | 0,998 | 0,997 | 0,995 |
| 10^3 | ПВ | 1,000 | 0,989 | 1,001 | 1,003 |
| 10^4 | VC | 0,989 | 0,978 | 0,970 | 0,967 |

Из таблицы 5 видно хорошее согласие расчетных результатов, выполненных с использованием поточечного (РОСФОНД) и группового (БНАБ) представления нейтронно-физических констант. При переходе от поточечной зависимости к групповому описанию констант результаты расчета практически не изменяются для указанных конфигураций эксперимента (не более 5 %) при погрешности измерений с помощью сфер Боннера в 10 %.

Основные результаты и выводы

1. Выполнен анализ экспериментальных данных и бенчмарк-экспериментов по исследованию свойств конструкционных материалов (железо, свинец, кремний и ниобий) в сферической и плоской геометриях.

Продемонстрировано, что имеющиеся нейтронные константы в библиотеке РОСФОНД по железу и свинцу удовлетворительно описывают бенчмарк-эксперименты в сферической геометрии. При этом отмечена

необходимость привлечения дополнительных экспериментальных данных для выработки обоснованных рекомендаций по корректировке выходов вторичных гамма-квантов.

Выполнена прецизионная оценка экспериментов по измерению функции пропускания нейтронов для кремния и ниобия в области энергий 0,3 - 3,0 МэВ и 0,07 - 3,0 МэВ, соответственно. Эти эксперименты могут быть рекомендованы для валидации нейтронно-физических констант.

2. Получены новые оценки резонансных параметров полного сечения для кремния и ниобия, на основе оцененных экспериментов по измерению функций пропускания нейтронов.

3. Показано, что использование новых оценок резонансных параметров полного сечения для кремния и ниобия позволяет сократить расчетно-экспериментальные расхождения в интегральных бенчмарк-экспериментах. Так, уточненные данные кремния позволили сократить расчетно-экспериментальные расхождения в спектральных индексах (F238/F235 - на 1,5 %; C197/F235 - на 20 %), измеренных на критических сборках (НММ005 и РММ001) с большим содержанием кремния в активной зоне. Использование уточненных нейтронно-физических констант ниобия позволяет получить результаты расчета эффективного коэффициента размножения в пределах экспериментальной погрешности бенчмарк-эксперимента НМФ047, чего до внесения изменений не удавалось сделать.

4. Выполнено совершенствование системы групповых констант CONSYST/БНАБ, а именно:

- (1) Получены новые матрицы рассеяния и образования вторичных гамма-квантов для всех материалов библиотеки БНАБ.
- (2) Расширена новыми функциональными возможностями программа подготовки констант CONSYST/GNDL.

5. Выполнено обоснование применимости константного обеспечения CONSYST/БНАБ для расчета радиационной защиты реакторов на быстрых

нейтронах на примере экспериментов JASPER, а также свинцовых и железных сфер с калифорниевым источником в центре.

Выявлено, что погрешность группового приближения в среднем не превышает ~5% для потока гамма-квантов и ~15% для нейтронного потока при расчетах характеристик бенчмарк-экспериментов, моделирующих прохождение ионизирующего излучения через железные и свинцовые сферы.

Продемонстрировано, что погрешность группового приближения не превышает ~5%, при экспериментальной точности измерений в ~10%, в расчетах бенчмарк-эксперимента JASPER, моделирующего защиту реактора на быстрых нейтронах, при ослаблении нейтронного потока до 10^4 раз.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. Кощев В.Н., Ломаков Г.Б., Теплухина Е.С. Переработка данных библиотеки РОСФОНД в групповые константы в формате MATXS и их верификация // Сборник докладов ежегодных межведомственных семинаров 2009 - 2011. – Обнинск, 2012. – Том 1. – С. 181-187.

2. Golovko Yu., Koscheev V., Lomakov G. et al. Verification of current version of ABBN constants and CONSYST code in calculation of criticality benchmarks // International Conference on Nuclear Data for Science and Technology «ND2013», New-York, USA, March 4 - 8, 2013.

3. Grabezhnoy V., Koscheev V., Lomakov G., Manturov G. Verification of the ABBN-RF2010 constants in calculations of shielding benchmarks // Progress in Nuclear Science and Technology (PNST) of Atomic Energy Society of Japan Vol. 4 (2014) pp. 587-590.

4. Головки Ю.Е., Кощев В.Н., Ломаков Г.Б. и др. Верификация современной версии констант БНАБ и программы подготовки CONSYST в расчетах критичности // Известия вузов. Ядерная энергетика. – Обнинск, 2014. – № 2. – С. 99-108.

5. Дедуль А.В., Кощев В.Н., Ломаков Г.Б. и др. Новые возможности программы CONSYST – форматы gndlmac и gndlmic для обеспечения

константами программ PMSNSYS и KINXYZ // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – Обнинск, 2014. – № 3. – С. 49-61. (доступна онлайн: <http://vant.ippe.ru/images/pdf/2014/3-6.pdf>).

6. Кощев В.Н., Ломаков Г.Б., Мантуров Г.Н., Цибуля А.М. Тестирование системы CONSYST/БНАБ-РФ в расчетах переноса гамма-квантов // Сборник тезисов докладов 10-ой Юбилейной Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», Москва – Обнинск, 22-25 сентября 2015, с. 20-22.

7. Ломаков Г.Б., Филиппов В.В. Оценка пропускания нейтронов для кремния и ниобия в области энергий 0,01 – 3 МэВ // Научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника – 2015), Обнинск, 12-16 октября 2015.

8. Кощев В.Н., Ломаков Г.Б., Мантуров Г.Н. и др. Состояние и верификация константного и программного обеспечения БНАБ // Научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» (Нейтроника – 2015), Обнинск, 12-16 октября 2015.

9. Кощев В.Н., Ломаков Г.Б. О возможности улучшения нейтронных данных для конструкционных материалов в библиотеке РОСФОНД // Научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» (Нейтроника – 2015), Обнинск, 12-16 октября 2015.

10. Ломаков Г.Б., Николаев М.Н., Филиппов В.В. Неэкспоненциальность пропускания нейтронов // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – Обнинск, 2016. – № 1 – С. 148-166 (доступна онлайн <http://vant.ippe.ru/images/pdf/2016/1-12.pdf>).

11. Андрианова О.Н., Ломаков Г.Б., Мантуров Г.Н. Уточнение нейтронных констант кремния и урана на основе интегральных и дифференциальных экспериментов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – Обнинск, 2016. – № 1. – С. 61-69.

12. Ломаков Г.Б., Филиппов В.В. Оценка экспериментов по пропусканию нейтронов для кремния в области энергий 300 – 3000 кэВ //

ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2016. – № 2. – С. 33-51 (доступна онлайн <http://vant.ippe.ru/images/pdf/2016/2-3.pdf>).

13. Ломаков Г.Б., Филиппов В.В. Оценка экспериментов по пропусканию нейтронов для ниобия в области энергий 7 – 3000 кэВ // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – Обнинск, 2016. – № 3, с. 5-23 (доступна онлайн <http://vant.ippe.ru/images/pdf/2016/3-1.pdf>).

14. Anrianova O., Koscheev V., Lomakov G., Manturov G. Neutron data adjustment based on integral critical experiments on the BFS-facility with different neutron spectrum // Proceeding of International Conference on Physics of Reactors «PHYSOR 2016», Sun Valley, ID, USA, May 1-5, 2016, pp. 2166-2175.

15. Andrianova O., Lomakov G., Manturov G. Examination of total cross section resonance structure of niobium and silicon in neutron transmission experiments // ND 2016 - Programme & Abstract Book, p. 146.

16. Кошечев В.Н., Ломаков Г.Б., Мантуров Г.Н., Семенов М.Ю., Цибуля А.М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612865 CONSYST-RF от 11.03.2016.

17. Грабежной В.А., Ломаков Г.Б., Мантуров Г.Н. Использование системы групповых констант БНАБ-РФ для расчетного анализа экспериментов по радиационной защите // Научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника 2016), Обнинск, 23-25 ноября 2016.

18. Андрианова О.Н., Ломаков Г.Б., Мантуров Г.Н. Совместное использование дифференциальных и интегральных экспериментов для уточнения оцененных ядерных данных // Научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника 2016), Обнинск, 23-25 ноября 2016.