

На правах рукописи

АНДРИАНОВА
Ольга Николаевна

**МЕТОДЫ И ПРОГРАММЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ
РЕЗОНАНСНОЙ СТРУКТУРЫ НЕЙТРОННЫХ СЕЧЕНИЙ НА РАСЧЕТНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Автор: _____

МОСКВА 2015

Работа выполнена в АО «Государственном научном центре Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»)

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: Дулин Виктор Алексеевич,
доктор физико-математических наук,
профессор,
АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»,
главный научный сотрудник

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: Казанский Юрий Алексеевич,
доктор физико-математических наук,
профессор,
Обнинский институт атомной энергетики
НИЯУ МИФИ,
профессор

Комлев Олег Геннадьевич,
кандидат технических наук,
ОАО «АКМЭ-инжиниринг»,
первый заместитель генерального
директора по производству

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Акционерное общество «Ордена Трудо-
вого Красного Знамени и ордена труда
ЧССР опытное конструкторское бюро
«ГИДРОПРЕСС»
(АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»)

Защита состоится «22» декабря 2015 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д520.009.06 в Национальном исследовательском центре «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 «___» _____ 2015г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



В.Г. Мадеев

ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа направлена на решение проблемы усовершенствования методов количественной оценки влияния неопределенности оцененных нейтронных данных на точность предсказания нейтронно-физических характеристик активных зон проектируемых реакторных установок на основе анализа интегральных экспериментов, выполненных на критических сборках быстрых физических стендов (БФС) ГНЦ РФ-ФЭИ.

Актуальность работы

Актуализация задач оценки погрешности расчета реакторных функционалов обусловлена ужесточением требований к надежности выполнения расчетных предсказаний проектных характеристик реакторных установок, обосновывающих точность конструкционных и технологических допусков, которые являются определяющими в оценках как уровней ядерной и радиационной безопасности, так и экономических показателей.

Погрешности реакторных расчетов принято делить на следующие составляющие: а) константная, обусловленная неопределенностью ядерных данных; б) методическая, связанная с приближениями методов решения уравнения переноса; в) технологическая, определяемая допусками параметров основных конструктивных элементов и их составами. Основным способом повышения точности и надежности расчетных предсказаний нейтронно-физических характеристик является усовершенствование методов оценки константной составляющей погрешности расчетов, включающее в себя развитие подходов к уточнению данных о неопределенностях оцененных нейтронных констант на основании информации о дифференциальных и интегральных экспериментах.

Несмотря на активизацию работ в данном направлении и предпринятые на национальных и международном уровнях усилия экспертами признается отсутствие достаточных данных, характеризующих неопределенности нейтронных констант в последних версиях оцененных библиотек ядерных данных. Основную причину сложившейся ситуации эксперты видят в недостатке детальной экспериментальной информации, восполнение которой не видится возможным на данный момент, и в отсутствии общих подходов к вычислению многоуровневых ковариаций при параметризации экспериментальных характеристик нейтронных сечений реакций взаимодействия.

Для решения указанных проблем в диссертации предложены метод статистического восстановления значений и неопределенностей резонансных параметров в условиях отсутствия экспериментальной информации на основе статистической теории распределений резонансов, а также подходы к решению задачи количественной оценки вклада неопределенности резонансной структуры нейтронных сечений в константную погрешность основных реакторных характеристик.

Степень разработанности проблемы исследования

Существующие подходы к оценке неопределенностей константой составляющей погрешности делятся на два класса: детерминистический, предполагающий вычисление «чувствительности» функционала (частной производной первого порядка) к одному из входных параметров, и статистический, основанный на ме-

тоде Монте-Карло, предполагающий одновременное варьирование всего набора входных параметров, возможные значения которых определяются соответствующими функциями распределения вероятности.

Детерминистический подход к оценке константной погрешности нейтронно-физических функционалов является наиболее проработанным с методической точки зрения и имеет более чем полувековой опыт применения, инициированный работами по обобщенной теории возмущения Л.Н. Усачева, В.В. Орлова и др. На основе данного метода разработан ряд известных программ, предназначенных для оценки погрешностей нейтронно-физических характеристик: TSUNAMI (Окриджская национальная лаборатория, США), RIB (Комиссариат по атомной энергии, Франция), ИНДЭКС (ГНЦ РФ-ФЭИ, Россия) и др.

Повышение производительности вычислительной техники (доступность многоядерных процессоров, суперкомпьютеров) в последние годы дало импульс к развитию статистических методов оценки неопределенностей. Применение метода Монте-Карло на всех этапах оценки неопределенностей от ядерных данных до реакторных функционалов (подход ТМС – Total Monte-Carlo) было предложено в 2008 г. Нидерландской консалтинговой группой по ядерному инжинирингу (NRG), которая разработала комплекс программ TALYS и библиотеку ядерных констант TENDL, позволяющих решать широкий класс задач по оценке неопределенностей в данной предметной области. Агентством по атомной энергии (Франция) в 2008 г. был разработан код NUDUNA (NUclear Data Uncertainty Analysis), базирующийся на ковариационных данных библиотек оцененных ядерных констант. Схожий алгоритм реализован в коде KIWI (Национальная исследовательская лаборатория им. Лоуренса, США). Модификация метода Монте-Карло на основе формулы Уилкса (метод GRS) легла в основу кода XSUSA системы SCALE (Окриджская национальная лаборатория, США).

Однако в указанных работах не проработаны проблемы определения ковариационных данных полного набора параметров, описывающих резонансную структуру сечений во всем диапазоне энергий; вычисления ковариационных матриц погрешностей факторов резонансной блокировки групповых нейтронных сечений (факторов самоэкранировки Бондаренко); корректной оценки влияния неопределенности оцененных нейтронных данных на точность предсказания реактивностных эффектов.

Объектом исследования являются параметры нейтронных взаимодействий и стационарные нейтронно-физические характеристики активных зон реакторных установок на быстрых нейтронах.

Предметом исследования является оценка константной погрешности расчетов нейтронно-физических характеристик, обусловленной неопределенностью оцененных нейтронных данных.

Целью диссертационной работы является развитие и усовершенствование методов, программных кодов оценки константной погрешности нейтронно-физических характеристик реакторных установок на быстрых нейтронах на основе неопределенностей оцененных нейтронных данных. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи.

- Разработка и программная реализация метода формирования полного набора резонансных параметров и их ковариационных матриц погрешностей на примере основных топливных изотопов ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu с последующим дополнением соответствующих секций файлов оцененных нейтронных данных Российской национальной библиотеки РОСФОНД¹.
- Определение ковариационных матриц погрешностей факторов резонансной блокировки групповых нейтронных сечений (факторов самоэкранировки Бондаренко) для инженерной библиотеки нейтронных констант БНАБ-РФ.
- Обоснование, адаптация метода и программная реализация статистической оценки константной неопределенности расчета нейтронно-физических характеристик для прецизионных транспортных кодов.
- Оценка константной погрешности основных реакторных функционалов на основании расчетного анализа интегральных экспериментов по изучению характеристик материалов активных зон реакторных установок на быстрых нейтронах.

Информационной базой исследования послужили базы данных по ядерным реакциям и национальные библиотеки оцененных ядерных данных, собранные Международной сетью центров по ядерным данным Международного агентства по атомной энергии², отчетная документация и публикации, размещенные на интернет-ресурсах Агентства по ядерной энергии³, базы экспериментальных данных EXFOR⁴, а также интегральных бенчмарк-экспериментов ICSBEP и IRPhEP⁵.

Методы проведенных исследований основаны на методах теорий нейтронных взаимодействий и переноса нейтронов, реакторной физики, теории вероятностей и математической статистики. Для проведения вариантных нейтронно-физических расчетов использован аттестованный прецизионный код MCNP⁶, в качестве библиотек нейтронных данных использовались расширенные в ходе выполнения работы библиотеки РОСФОНД и БНАБ-РФ.

Положения, выносимые на защиту

- Статистический метод, расчетный код и результаты оценки полного набора резонансных параметров и их ковариационных матриц погрешностей для основных топливных изотопов (^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu) Российской национальной библиотеки оцененных нейтронных данных РОСФОНД.
- Алгоритм и результаты вычисления ковариационных матриц погрешностей факторов резонансной блокировки групповых нейтронных сечений (факторов самоэкранировки Бондаренко) для основных топливных изотопов (^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu) инженерной библиотеки нейтронных констант БНАБ-РФ.
- Комплекс программ статистической оценки константной погрешности расчета нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов для прецизионных транспортных кодов с учетом неопределенностей нейтронных сечений.

¹ <http://www.ippe.ru/podr/abbn/libr/rosfond.php>

² <https://www.nds.iaea.org/nrdc>

³ <https://www.oecd-nea.org/science/wpncs>

⁴ <https://www.nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>

⁵ <https://www.oecd-nea.org/science/wpncs/icsbep/handbook.html>

⁶ <https://mcnp.lanl.gov>

- Результаты оценки влияния неопределенностей нейтронных сечений основных топливных изотопов (^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu) на погрешность расчетов нейтронно-физических характеристик активных зон реакторных установок на быстрых нейтронах.

Научная новизна работы

- Впервые реализован и верифицирован статистический метод восстановления узких резонансов в условиях отсутствия экспериментальной информации, позволивший дополнить существующие данные по нейтронным резонансам ^{235}U в разрешенной области энергий.
- Впервые на примере основных топливных изотопов (^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu) предложен метод получения данных по ковариационным матрицам погрешностей полного набора резонансных параметров (в разрешенной и неразрешенной областях энергий), которые позволяют повысить точность расчетных предсказаний реакторных характеристик.
- Впервые разработан и применен алгоритм оценки ковариационных матриц погрешностей факторов резонансной блокировки групповых нейтронных сечений для инженерной библиотеки констант БНАБ-РФ на основе погрешностей резонансных параметров с учетом дифференциальных экспериментов по измерению функций пропускания нейтронов и самоиндикации образцов на времяпролетной базе реактора ИБР.
- Впервые предложен статистический подход и разработан комплекс программ учета неопределенностей резонансных параметров для оценки погрешности прецизионных расчетов нейтронно-физических характеристик реакторных установок как в поточечном, так и групповом представлении нейтронных сечений.
- Впервые получены результаты влияния неопределенностей резонансной структуры нейтронных сечений топливных изотопов (^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu) на константную составляющую погрешности в нейтронно-физических расчетах активных зон реакторов на быстрых нейтронах. Дано объяснение эффектов, выявленных в экспериментах на быстрых физических стендах и обусловленных различиями в резонансной блокировке сечений захвата и деления.

Практическая значимость и внедрение результатов диссертации

- Данные по ковариационным матрицам погрешностей резонансных параметров и факторов резонансной блокировки групповых нейтронных сечений основных топливных изотопов (^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu) дополнили Российскую национальную систему нейтронных констант РОСФОНД/БНАБ-РФ.
- Расчетные модели экспериментов по измерению функций пропускания пучка нейтронов через образцы ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu на времяпролетной базе реактора ИБР предназначены для проведения верификационных расчетов систем нейтронных констант и вошли в базу данных по фундаментальным экспериментам международного справочника по критической безопасности ICSBEP⁷.
- Оценки интегральных экспериментов на критических сборках БФС, имитирующих составы различных энергетических быстрых реакторов и систем

⁷ ICSBEP (FUND-JNR-1/E-MULT-TRANS-001)

внешнего топливного цикла, предназначены для верификации транспортных кодов и систем нейтронных констант расчетов реакторов, вошли в базу данных международного справочника по реакторным экспериментам IRPhEP⁸.

- Алгоритмы повышения эффективности расчетов локальных функционалов критических систем с сильной гетерогенностью с использованием комбинаций методов понижения дисперсии позволяют проведение серийных верификационных тестов и статистической оценки погрешности нейтронно-физических характеристик реакторов, а сформулированные рекомендации вошли в учебное пособие для студентов ядерных специальностей.
- Комплекс программ оценки влияния неопределенностей резонансной структуры нейтронных сечений на погрешность прецизионных расчетов нейтронно-физических характеристик может быть использован для предсказания точности проектных характеристик активных зон реакторных установок на быстрых нейтронах.

Достоверность и обоснованность научных положений, разработанных методов и результатов обусловлены применением известных методов математической статистики, использованием оцененных нейтронных данных из информационных баз авторитетных международных организаций, проведением верификационных расчетов по аттестованным программным кодам, сопоставлением результатов расчетов с данными общепризнанных бенчмарк-экспериментов, включенных в международные справочники.

Личный вклад соискателя заключается в том, что соискатель лично выполнил все этапы работы, включая исследование и формирование данных по неопределенностям параметров описания резонансной области сечений, подбор методов оценки погрешностей, расчетный анализ экспериментов, реализацию методов статистического анализа, проведение многовариантных расчетов и статистическую обработку результатов, разработку программных кодов, формулировку выводов и рекомендаций.

Апробация результатов диссертации. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных и общероссийских конференциях, семинарах и форумах:

- на международных конференциях по расчету ядерных реакторов PHYSOR-2012 (г. Ноксвилл, США), PHYSOR-2014 (г. Киото, Япония);
- на международной конференции по нейтронным данным ND-2013 (г. Нью-Йорк, США);
- на международных конференциях по расчетным методам в области критической безопасности ICNC-2007 (г. Санкт-Петербург, Россия), ICNC-2011 (г. Эденбург, Шотландия);
- на международном семинаре по взаимодействию нейтронов с ядрами ISINN-2005 (г. Дубна, Россия);
- на отраслевых семинарах «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики – Нейтроника», ежегодно с 2006 по 2011 гг. (г. Обнинск, Россия);

⁸ IRPhEP (MIX-MISC-MIXED-001, BFS2-FUND-EXP-001, BFS1-FUND-EXP-001, BFS1-FUND-EXP-002, BFS1-FUND-EXP-003)

- на XV семинаре по проблемам физики реакторов «Волга 2010» (г. Москва, Россия);
- на семинарах научной сессии НИЯУ МИФИ-2011, 2012, 2015 (г. Москва, Россия).

Публикации. Основной материал диссертации представлен в 25-ти работах, из которых 6 статей в научных рецензируемых журналах из списка ВАК; 6 публикаций, проиндексированных в международных базах данных WoS и Scopus; 11 материалов конференций и тезисов докладов; препринт ГНЦ РФ-ФЭИ и учебное пособие.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, библиографического списка, включающего в себя 154 наименования. Работа имеет три приложения и изложена на 152-х страницах с 36-ю иллюстрациями и 26-ю таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** раскрыты актуальность рассматриваемой темы и степень ее разработанности, сформулирована цель и задачи исследования, указаны предмет и объект исследования, методы, подходы и информационная база работы. Приведены положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна и практическая значимость результатов.

Реализованный в работе статистический метод оценки погрешности функционалов многих переменных, определяемых значениями и ковариационными матрицами погрешностей, состоит из следующих этапов: формирование случайных наборов входных данных на основе многомерной функции распределения плотности вероятности, выполнение вариантных расчетов и статистическая обработка результатов. Каждый этап сопряжен с определенными методическими проблемами, описанию предложенных решений которых посвящены соответствующие разделы диссертации.

Входными данными являются нейтронные константы, содержащиеся в файлах библиотек оцененных ядерных данных (ОЯД) в формате ENDF-6 (рис.1). Оцениваемыми функционалами являются нейтронно-физические характеристики активных зон быстрых реакторов. Анализ, отбору и проверке на корректность входных нейтронных данных, а также вычислению границ предельных значений и получению ковариационных матриц погрешностей всего набора резонансных параметров посвящена глава I. В главе II описан расчетный код формирования на основе ковариационных матриц погрешностей наборов файлов оцененных нейтронных данных для проведения вариантных прецизионных транспортных расчетов. В главе III приведены результаты тестовых расчетов характеристик простых по геометрии интегральных бенчмарк-экспериментов, на которых верифицированы методы постобработки, а также продемонстрирована возможность учета информации о дифференциальных экспериментах для уточнения групповых факторов резонансной блокировки. В главе IV на основании анализа интегральных экспериментов на критических стендах БФС сделаны выводы о точности предсказания основных нейтронно-физических характеристик активных зон тестовых моделей быстрых реакторов.

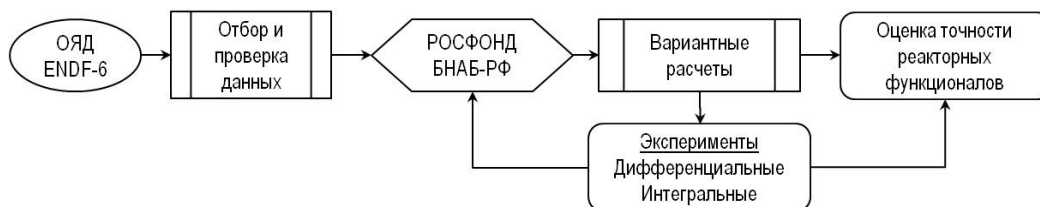


Рис.1. Схема статистической оценки погрешностей реакторных характеристик от ОЯД

Глава I посвящена описанию статистических методов получения значений резонансных параметров и их ковариационных матриц погрешностей в условиях отсутствия экспериментальных данных.

В §1.1 проанализированы оценки резонансных параметров нейтронных сечений файлов рекомендованных версий библиотек ENDF/B, JENDL и TENDL. Проведено сопоставление принятых оценок, описаны алгоритм и программные коды формирования данных, отмечены недостатки принятых оценок. Анализ принятой в настоящее время оценки резонансной области ^{235}U (Л.К.Лил и др. 1997 г.) выявил существенный пропуск резонансов с малыми нейтронными ширинами в области энергий разрешенных резонансов.

В §1.2 предложен статистический метод восстановления пропущенных в экспериментах и неучтенных в существующих оценках узких резонансов на основе обобщенной статистической теории резонансных параметров Портера-Томаса. Метод базируется на обобщении огромного объема накопленной экспериментальной информации, согласно которой статистические флуктуации квадратов амплитуд, соответствующие приведенным ширинам нейтронных резонансов, с хорошей точностью удовлетворяют χ^2_ν -распределению (распределение Портера-Томаса для ν каналов):

$$P_\nu(x)dx = (\nu x/2)^{(\nu-2)/2} \cdot \exp(\nu x/2) \cdot \Gamma^{-1}(\nu/2) \cdot (\nu/2) dx,$$

где x – отношение ширин отдельных резонансов к средней ширине данной реакции.

Согласно наблюдаемому в экспериментах эффекту «отталкивания» уровней, флуктуации отношения расстояний между двумя ближайшими резонансами со спином J к среднему расстоянию между ними во всем рассматриваемом интервале энергий $y = (\tilde{E}_\lambda - E_{\lambda-1})/\bar{D}_J$ подчиняются распределению Вигнера:

$$F(y)dy = (\pi y/2) \cdot \exp(-\pi y^2/4) dy.$$

На основании данных положений была разработана методика пополнения совокупности разрешенных резонансов. Выполнена оценка значений резонансных параметров ^{235}U и вычислены ковариационные матрицы погрешностей резонансных параметров.

Проведена серия верификационных расчетов бенчмарк-моделей экспериментов из международного справочника по критической безопасности ICSBER с обогащенным ураном для систем с быстрым (серия HEU-MET-FAST), промежуточным (серия HEU-MET-INTER) и тепловым (серия HEU-THERM-SOL) спектрами нейтронов.

Результаты расчета критичности демонстрируют корректность выполненной оценки резонансной области ^{235}U . Показано, что влияние пропущенных резонансов на критичность систем с быстрым и тепловым спектрами нейтронов мало. Так, например, максимальная величина вклада в k_{eff} составляет $\sim 0.06\%$ в тепловом спектре нейтронов, что намного меньше расчетных погрешностей, составляющих $\sim 0.3\%$. При этом учет пропущенных резонансов позволил существенно сократить расчетно-экспериментальные расхождения для систем с промежуточным спектром нейтронов. Предложенная в работе оценка резонансной области ^{235}U позволила описать эксперименты по измерению центральных коэффициентов реактивности и отношений сечений ядерных реакций, выполненных на критической сборке БФС – модели геологических хранилищ отработавшего ядерного топлива (HEU-MET-INTER-005, рис.2).

В §1.3 предложенный статистический метод восстановления резонансов был распространен на оценку неопределенностей резонансных параметров. Анализ принятых в настоящее время оценок ковариационных данных резонансных параметров ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu (секция MF=32 файлов библиотек ОЯД ENDF/B, JENDL, TENDL) показал, что в файлах приводится информация не для всех резонансных параметров, а только для небольшой части широких резонансов, измеренных с хорошим разрешением.

Приводимые погрешности ширин узких резонансов в библиотеках ОЯД носят противоречивый характер: их погрешности либо обнуляются, либо им приписываются завышенные значения, превышающие 100%, что приводит к нефизическим значениям ширин резонансов. Для иллюстрации на рис.3 приведены оценки из библиотек JENDL-3.3 и 4.0 набора погрешностей разрешенных резонансных параметров (секция MF=32 ковариационных матриц погрешностей для приведенных в секции MF=2 резонансных параметров), демонстрирующих отмеченную проблему оценки погрешностей узких резонансов. В JENDL-4.0 погрешности ширин резонансов ^{238}U в области энергий от 10^{-5} до $1.5 \cdot 10^3$ эВ содержат порядка 70% узких резонансов с относительными погрешностями ширин радиационного захвата, лежащими в интервале от 50 до 100%, что не позволяет интерпретировать приведенные ковариационные матрицы погрешностей в качестве параметров какого-либо многомерного распределения (нормального или логнормального). Полученная на их основе оценка погрешностей факторов блокировки групповых сечений приводит к нефизическим разрывам в их значении, что является дополнительным свидетельством некорректности этих данных.

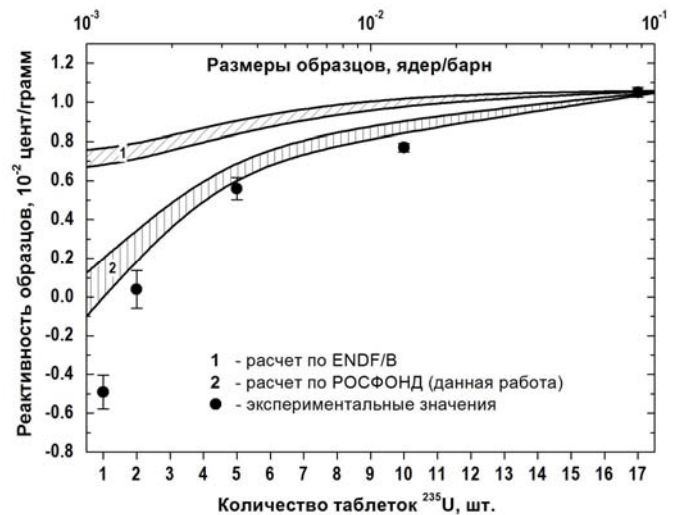


Рис.2. Эксперименты по измерению центральных коэффициентов реактивности

Сложившаяся ситуация обусловлена следующими обстоятельствами: 1) погрешность в определении площади широких резонансов определяется в значительной степени погрешностью интегрального сечения захвата по этой области энергий; 2) ограничение по разрешающей способности измерительной аппаратуры обуславливает высокие (нефизические) погрешности (более 100%) для узких резонансов; 3) существуют области энергий, для которых отсутствуют экспериментальные данные.

Предложенный статистический метод восстановления резонансов был использован для оценки неопределенностей резонансных параметров, и позволил преодолеть проблемы, связанные с получением ковариационных данных резонансных параметров. С использованием предложенного статистического метода были определены значения и неопределенности узких резонансов ^{235}U , оценены неопределенности (диапазоны изменений значений) резонансов основных делящихся изотопов (^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu), информация о погрешностях которых отсутствует в принятых оценках библиотек ОЯД (табл.1).

В главе II дано описание метода и разработанного комплекса программ статистической оценки константной погрешности прецизионных транспортных расчетов (на основе MCNP) в групповом и детальном представлении нейтронных сечений.

В §2.1 рассмотрены и классифицированы методы оценки константной погрешности расчета реакторных функционалов (табл.2). Основным и наиболее проработанным подходом к оценке константной погрешности является детерминистический метод (метод анализа чувствительностей). Для оценки константной погрешности в рамках данного подхода необходимо вычислить 1) коэффициенты чувствительности оцениваемых функционалов, вычисление которых становится трудоемким для функционалов, зависящих от пространственных координат, и 2) полную матрицу ошибок групповых констант, для определения которой не существует формализованных математических процедур и которая формируется на основании экспертных оценок. Также при получении матриц ошибок групповых констант не предусмотрена возможность непосредственного учета ковариационных матриц погрешностей резонансных параметров: все погрешности получают в приближении бесконечного разбавления и без учета погрешностей факторов резонанс-

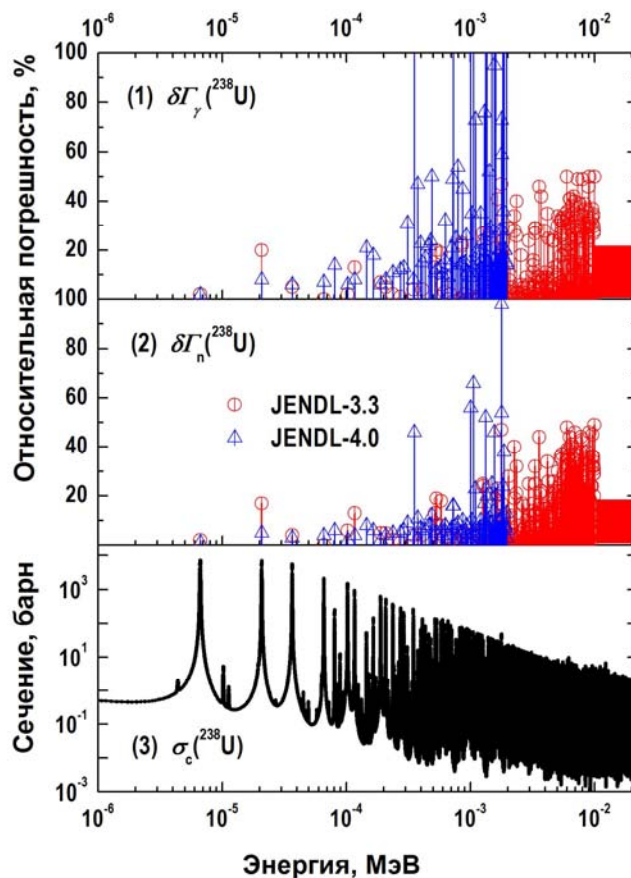


Рис.3. Неопределенности резонансных параметров ^{238}U JENDL 3.3, 4.0 (в процентах приведены относительные ошибки нейтронных (1) и радиационных (2) ширин) и энергетическая зависимость сечения радиационного захвата (3)

ной блокировки, погрешность которых является определяющей в оценке точностей расчетов эффектов реактивностей.

Таблица 1. Сводные данные по резонансной области из библиотек ОЯД

Элемент	Библиотеки ОЯД	Область разрешенных резонансов				Область неразрешенных резонансов	
		Число резонансов MF=2	Число резонансов MF=32	Интервал, эВ	Тип данных	Интервал, эВ	Тип данных
²³⁵ U	JENDL-4.0	3193	421	$10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^2$	D, CORR	Нет	
	TENDL-2014		2140		D	$2.25 \cdot 10^3 \cdot 2.5 \cdot 10^4$	D
	ENDF/B-VII		1360		D	$2.25 \cdot 10^3 \cdot 2.5 \cdot 10^4$	D
	РОСФОНД (данная работа)		3193		D, CORR	$2.25 \cdot 10^3 \cdot 2.5 \cdot 10^4$	D, CORR
²³⁸ U	JENDL-3.3	926/2417	317	$10^{-5} \cdot 10^4$	COV	$10^4 \cdot 1.5 \cdot 10^5$	COV
	JENDL-4.0		116/238		D, CORR	Нет	
	TENDL-2014		1393		D	$2 \cdot 10^4 \cdot 1.5 \cdot 10^5$	D
	ENDF/B-VII		356		COV		COV
	РОСФОНД (данная работа)		3343		D, CORR		D, CORR
²³⁹ Pu	JENDL-3.3	405/441/224	268	$10^{-5} \cdot 2.5 \cdot 10^3$	COV	$2.5 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^4$	COV
	TENDL-2014		1070		D		D
	ENDF/B-VII		268		COV		COV
	РОСФОНД (данная работа)		1070		D, CORR		D, CORR

Достоинством статистических методов оценки погрешностей является то, что они позволяют напрямую учесть неопределенность резонансных параметров, которая является определяющей в погрешностях расчетных предсказаний ряда эффектов реактивности в размножающихся системах с быстрым и промежуточным спектром нейтронов.

Таблица 2. Классификация расчетных кодов оценки погрешностей реакторных функционалов

Тип входных данных	Метод	
	Статистический	Детерминистический
EXFOR и атлас резонансных параметров (без ковариационных данных)	TMC (NRG)	-
Библиотеки ОЯД (формат ENDF-6) Ковариационные данные ОЯД (MF=32)	NUDUNA (AREVA) KIWI (LLNL) MCNP-ACAB (LANL) <i>Данная работа</i>	-
Групповые константы Библиотеки ковариационных данных (MF=33)	SCALE/XSUSA (ORNL) TRIUM (ФЭИ)	SCALE/Tsunami (ORNL) RIB (CEA) ИНДЕКС (ФЭИ)

В §2.2 приведено описание разработанного комплекса программ для статистической оценки константной погрешности расчетных функционалов на основе неопределенностей оцененных нейтронных данных. Разработанный комплекс программ представляет собой набор модулей, предназначенных для проведения вариантов расчетов на основе формирования случайных наборов файлов входных параметров (рис.4).

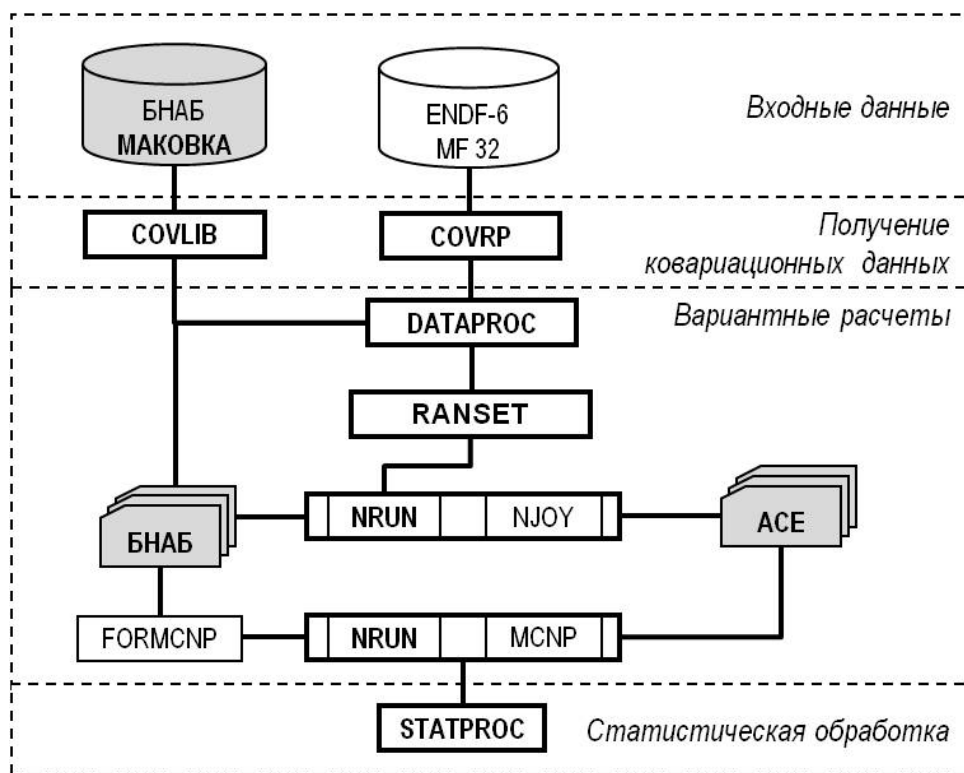


Рис.4. Структура программного комплекса (блоки, выделенные жирными линиями, – разработанные программные модули, серые блоки – полученные данные)

Система позволяет насчитывать заданное количество наборов файлов согласно ковариационным данным резонансных параметров, взятых из файлов в формате ENDF-6. Набор файлов из формата ENDF-6 для проведения вариантных транспортных расчетов с помощью интегрированного в систему кода NJOY может быть преобразован в наборы файлов в форматах ACE (формат поточечного представления нейтронных сечений) и БНАБ (групповые нейтронные сечения и факторы резонансной блокировки). По данным многовариантных расчетов на базе прецизионного транспортного кода MCNP выполняется оценка константной составляющей погрешности нейтронно-физических функционалов.

Для применения статистических подходов необходимо сделать предположение о виде распределения функций вероятности как входных параметров, так и оцениваемых по этим данным расчетных функционалов. Как правило, предполагается, что распределение погрешностей входных параметров имеет вид многомерного нормального распределения, генерация коррелированного набора данных для которого является нетривиальной задачей.

Если относительные погрешности данных невелики (не превышают 30%), задача сводится к генерации n независимых одномерных нормальных распределений посредством диагонализации ковариационной матрицы. Любая положительно определенная матрица может быть диагонализирована путем спектрального разложения: $\Sigma = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{U}^T = \mathbf{U}\mathbf{D}^{1/2} \cdot (\mathbf{U}\mathbf{D}^{1/2})^T$, где \mathbf{U} – матрица собственных векторов, \mathbf{D} – диагональная матрица собственных значений. Согласно свойствам ковариационных матриц, вектор случайных величин \mathbf{x} , распределенный по многомерному нормальному распределению с параметрами $\boldsymbol{\mu}$ (вектор средних значений) и Σ (ковариационная матрица), может быть получен из разложения $\mathbf{x} \sim N(\boldsymbol{\mu}, \Sigma) \equiv \boldsymbol{\mu} + \mathbf{U}\mathbf{D}^{1/2}N(\mathbf{0}, \mathbf{I})$.

Если относительные погрешности велики (более 30%), некоторая часть значений x будет лежать в отрицательной области значений. В этом случае принято переходить к логнормальному распределению. Если вектор x распределен по логнормальному распределению $LN(?_x, \Sigma_x)$, вектор y , компоненты которого определяются как $y_i = \ln(x_i)$, имеет нормальное распределение $N(?_y, \Sigma_y)$. Параметры $?_x, \Sigma_x$ логнормального распределения вычисляются путем преобразования из $?_y, \Sigma_y$.

В работе показано, что применение данного подхода для задач оценки неопределенностей ОЯД в связи с большой размерностью ковариационных матриц резонансных параметров (более десятков тысяч коррелирующих параметров) приводит к вычислительным трудностям, обусловленным неположительной определенностью преобразованных ковариационных матриц Σ_y .

Были проанализированы подходы, применяемые в зарубежных системах оценки константой погрешности TMC (NRG), NUDUNA (AREVA), и показано, что в случае больших погрешностей резонансных параметров (более 50%) все они приводят к большим смещениям выборочных средних значений и среднеквадратичных отклонений. По этой причине в зарубежных системах оценки константой погрешности на основе статистических подходов в рассмотрение не включают параметры, ошибки которых превышают 50%, тем самым исключаются из анализа некоторые энергетические области.

В работе предложен новый альтернативный подход к генерации коррелированного набора данных из многомерного нормального распределения, основанный на следующих наблюдениях. Во-первых, поскольку ковариационные матрицы погрешностей резонансных параметров имеют блочную структуру, то следует применять алгоритмы блочного преобразования матриц на независимые или попарно зависимые блоки положительно определенных матриц, внутри которых параметры являются зависимыми, что позволяет существенно сократить размерность задачи.

Во-вторых, чтобы избежать получение нефизических результатов (отрицательных ширин резонансов), резонансные параметры следует вычислять по усеченному многомерному нормальному распределению. Если вектор x случайных значений многомерного нормального распределения с параметрами μ и Σ имеет область определения $S = \{(a_i < x_i < b_i), i = 1, 2, \dots, N\}$, то усеченная функция многомерного нормального распределения определяется как

$$f(x, \mu, \Sigma) = [C(\mu, \Sigma)]^{-1} (2\pi)^{-n/2} |\Sigma|^{-1/2} \exp\left[-\frac{1}{2}(x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu)\right] I_S(x)$$

где $I_S(x)$ – функция индикации, принимающая значение равно единице для x , лежащих в S , и нулю – в противном случае; $C(?_y, \Sigma)$ – нормировочная константа.

В §2.3 описан алгоритм получения ковариационных данных для инженерной системы групповых констант БНАБ-РФ. С помощью интегрированного в комплекс программ кода NJOY набор файлов из формата ENDF-6 может быть переработан в набор групповых констант в формате БНАБ (сечения и факторы резонансной блокировки). После статистической обработки программный комплекс позволяет вычислять ковариационные матрицы погрешностей как групповых нейтронных сечений с кросскорреляциями по типам реакций, так и факторов резонансной блокировки групповых сечений по реакциям, сечениям разбавления и

температуре.

Пусть \mathbf{x}^l – набор N вариантов случайных значений, соответствующих плотности $p(\mathbf{x})$ многомерного нормального распределения, где $l=1, \dots, L$ – тип резонансных параметров формализма Рейха-Мура (ширины резонансов и их положения); \mathbf{x}_0 – вектор средних значений параметров; $\Sigma_{\mathbf{x}}$ – ковариационная матрица погрешностей. Наборы средних значений и ковариационные матрицы погрешности групповых сечений вычисляются как функции случайных значений резонансных параметров $\sigma_i = g(\mathbf{x}^l)$, где i – номер группы:

$$E(\mathbf{x}) = \int g(x) p(x) dx \Rightarrow \bar{\sigma}_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sigma_i^n, \quad \bar{\sigma}_i \equiv \sigma_i^0 = g(\mathbf{x}_0^l)$$

$$\text{Cov}(\mathbf{x}) = \int g(x)^2 p(x) dx - \left(\int g(x) p(x) dx \right)^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Sigma_{ij} = \frac{N}{N-1} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\sigma_i^n)^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sigma_i^n \right)^2 \right) \equiv \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\sigma_i^n - \sigma_i^0)(\sigma_j^n - \sigma_j^0)$$

Вычисленные ковариационные матрицы проверяются на корректность (положительную определенность), в случае необходимости корректируются на основании формулы Фробениуса. Полученные данные могут быть использованы для оценки константной погрешности расчетов, в т.ч. реактивных эффектов стационарного состояния реактора (доплеровского коэффициента реактивности, пустотного натриевого эффекта реактивности, эффективности стержней органов регулирования и др.) с учетом неопределенностей резонансной структуры в рамках метода анализа чувствительности. Под реактивностью понимают разность в k_{eff} в начальном и конечном состояниях критичности $\rho_{1-2} = 1/k_1 - 1/k_2 = \lambda_1 - \lambda_2$. Относительный коэффициент чувствительности нейтронных констант к коэффициенту реактивности равен $S_{\rho, \alpha} \equiv \alpha / \rho_{1-2} (\partial \rho_{1-2} / \partial \alpha) = (\lambda_2 S_{k_2, \alpha} - \lambda_1 S_{k_1, \alpha}) / \rho_{1-2}$, где $S_{k, \alpha} = \alpha / k (\partial k / \partial \alpha)$. На основании вычисленной ковариационной матрицы погрешностей групповых сечений с учетом факторов резонансной самоэкранировки $C_{\alpha\alpha}$ может быть вычислена относительная погрешность коэффициента реактивности

$$\Delta \rho_{1 \rightarrow 2} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \right)^2 S_{\lambda_1} C_{\alpha\alpha}^1 S_{\lambda_1}^T + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \right)^2 S_{\lambda_2} C_{\alpha\alpha}^2 S_{\lambda_2}^T - \left(\frac{2\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \right)^2 S_{\lambda_2} C_{\alpha\alpha}^{1 \rightarrow 2} S_{\lambda_1}^T.$$

Глава III посвящена верификации комплекса программ и нейтронных данных на основании бенчмарк-экспериментов, а также оценке константной погрешности простых по геометрии и составу интегральных экспериментов.

В §3.1 представлены результаты верификации разработанного комплекса программ и полученных оцененных нейтронных констант для основных делящихся изотопов (^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu). Рассмотрен набор экспериментов по измерению критичности и отношений скоростей реакций делящихся изотопов из международного справочника оцененных тестовых экспериментов по критической безопасности ICSBER. Проведено сравнение разных методов оценок константной погрешности с учетом и без учета неопределенностей резонансной структуры нейтронных сечений, полученных по различным библиотекам ОЯД. Показана непротиворечивость полученных результатов с результатами других авторов.

Выполнено исследование сходимости статистического метода в зависимости от числа вариантных расчетов. В случае, когда транспортные расчеты проводятся по программам на основе метода Монте-Карло (например, MCNP), погрешность

расчета определяется как сумма погрешности нейтронных констант и средней статистической погрешности расчета функционала:

$$\delta f^2_{\text{полн.}} = \delta f^2_{\text{ояд}} + \langle \delta f^2_{\text{стат.}} \rangle.$$

Количество вариантов расчетов и число вариаций входных параметров для достижения заданного уровня доверительной вероятности вычисляется по формуле Уилкса⁹, определяющей доверительный интервал результирующего функционала в условиях отсутствия информации о функции распределения:

$$P \left[\int_{L_1}^{L_2} f(y) dy \geq \beta \right] = \alpha,$$

где α – уровень доверительной вероятности; β – вероятность попадания в т.н. «толерантный интервал» с границами (L_1, L_2) . Если $L_1 = y_{\min}$ и $L_2 = y_{\max}$, то минимально необходимое число расчетов N , начиная с которого все значения случайной величины будут лежать внутри двухстороннего толерантного интервала, определяется по формуле $1 - \beta^N - N \cdot (1 - \beta) \cdot \beta^{N-1} = \alpha$. Применение данной формулы позволяет определить, что для уровня доверительной вероятности α/β , равного 95%/95%, необходимое число расчетов $N = 93 \approx 100$, а для 99%/99% – $N = 662 \approx 1000$. Для обоснования применимости данной формулы в условиях многоуровневых корреляций входных параметров требуется проведение статистических тестов.

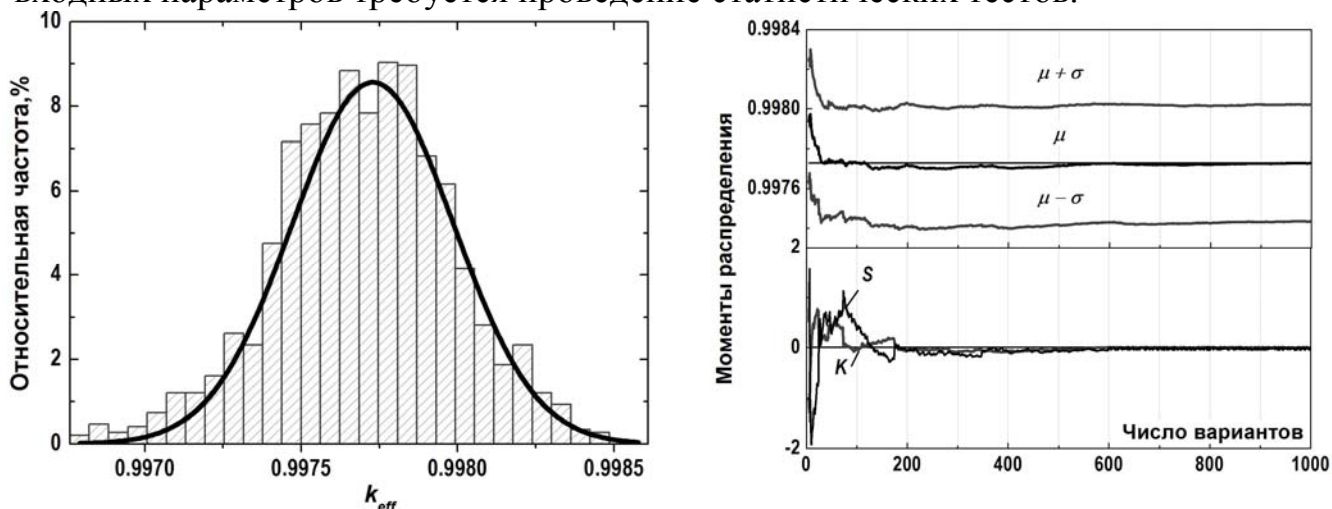


Рис.5. Пример выдачи результатов статистической обработки вариантных расчетов эффективного коэффициента размножения для модели SCHERZO

Статистические тесты зависимостей нейтронно-физических функционалов от числа расчетов N показали, что начиная с $N=200$ не наблюдается сильных флуктуаций моментов распределения от первого до четвертого порядка случайной величины. Для $N > 500$ получаемые плотности распределений расчетных функционалов с достаточной точностью описываются нормальным распределением (рис.5¹⁰).

В §3.2 проведен расчетный анализ экспериментальных зависимостей измерений функций пропускания нейтронов, выполненных на нейтронных пучках импульсного быстрого реактора ИБР в Объединенном институте ядерных исследований в г. Дубна в период 1969–1982 гг. (табл.3).

⁹ Wilks S.S. Statistical Prediction with Special Reference to the problem of Tolerance Limits. Ann. Math. Stat. (1942).

¹⁰ ? – среднее значение, σ – среднеквадратичный разброс, S – коэффициент асимметрии, K – эксцесс

Таблица 3. Характеристики экспериментальных образцов-фильтров урана и плутония

Изотоп	Тип функции пропускания	Энергетический интервал	Число экспериментов
^{238}U	Полное	0.1 – 200 кэВ	8
^{235}U	Полное	4.64 эВ – 21.5 кэВ	7
	Деление		6
^{239}Pu	Полное		7
	Деление		5

Соискателем составлены детальные прецизионные расчетные модели для транспортного кода MCNP, выполнен анализ источников и вкладов в погрешность экспериментальных данных, измерений нейтронных функций пропускания, нейтронных сечений и эффектов резонансной блокировки основных делящихся изотопов (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu) в диапазоне энергий от 2 эВ до 200 кэВ. Оценка экспериментов была включена в базу Международного справочника тестовых экспериментов по критической безопасности ICSBER (FMT-001).

Доплеровские коэффициенты пропускания измерены для различных толщин образцов-фильтров урана и плутония для набора температур, и представляют собой отношения функций пропускания вида $\Delta Ft = Ft(T_1, h)/Ft(T_2, h)$, где функции пропускания определяются по формуле:

$$Ft_{\alpha}(h) = \int_{\Delta E} \varphi(E) \exp(-\sigma_{\alpha}(E) \cdot h) dE \Bigg/ \int_{\Delta E} \varphi(E) dE ,$$

где α – тип реакции функции пропускания; $\varphi(E)$ – поток нейтронов; h – толщины образцов-фильтров.

В §3.3 предложен алгоритм учета экспериментов по пропусканию нейтронов для уточнения ковариационных матриц погрешностей факторов блокировки групповых сечений реакции f_{α} :

$$f_{\alpha} = \int_0^{\infty} Ft_{\alpha}(h) dh \Bigg/ \int_0^{\infty} Ft_r(h) dh .$$

На рис.6 на примере обработки результатов многовариантного расчета фактора резонансной блокировки сечения захвата ^{238}U в 28-ми групповом представлении формата БНАБ продемонстрирован предложенный алгоритм уточнения доверительного интервала изменения значения фактора блокировки с учетом экспериментов по измерению функции пропускания нейтронов.

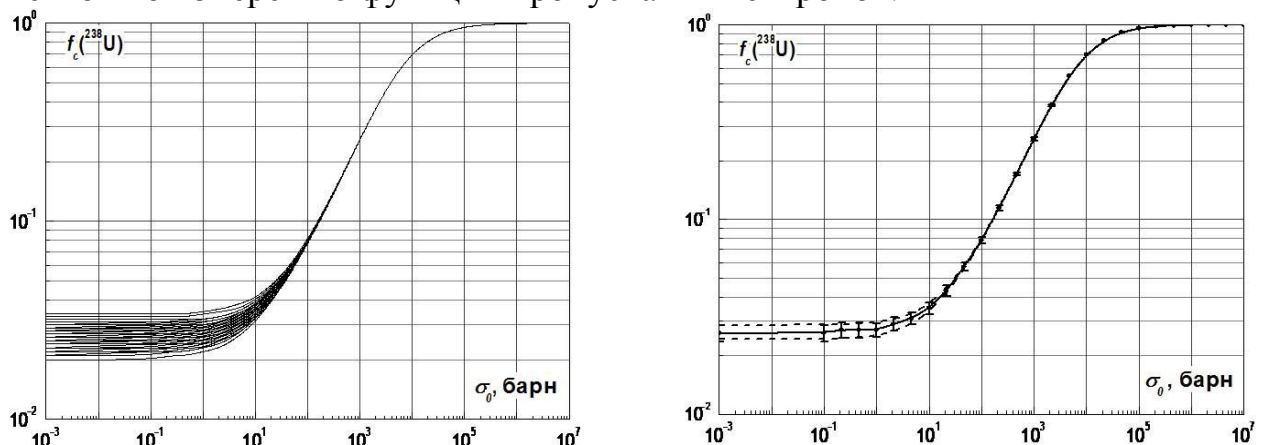


Рис.6. Пример учета экспериментов по измерению функции пропускания для определения погрешности фактора блокировки ^{238}U в 21-ой энергетической группе системы БНАБ-РФ

Глава IV посвящена оценке интегральных экспериментов на критических стендах моделей активных зон реакторных установок, на основании которых сделаны выводы о точностях предсказания основных нейтронно-физических характеристик жидкометаллических реакторов на быстрых нейтронах с урановым и смешанным уран-плутониевым топливом.

В §4.1 описаны подходы к повышению точности расчета реакторных характеристик с использованием прецизионного транспортного кода MCNP для систем с сильной гетерогенностью. Указаны основные нерешенные проблемы по оценке интегральных характеристик, а также трудности, связанные с составлением экспериментальных матриц верификации. Проведен анализ возможных способов повышения точностей расчетных предсказаний, в т.ч. с учетом информации об интегральных экспериментах. Показано, что использование уточненных резонансных параметров ^{235}U позволило существенно уменьшить различия между расчетом и экспериментом для систем с промежуточным спектром нейтронов, а также дать объяснение эффектов, выявленных в экспериментах на критических сборках БФС и обусловленных различиями в резонансной блокировке сечений захвата и деления.

В §4.2 приведено описание выполненных расчетных оценок интегральных экспериментов на критических сборках БФС. Особое внимание уделено работам по анализу измерений распределения скоростей реакций и возмущений реактивности, важных как для получения информации для уточнения нейтронных данных, так и оценки точности некоторых важных реакторных характеристик (например, измерение отношений скоростей захватов ^{238}U и делений ^{235}U (C8/F5) позволяет оценить точность предсказания коэффициента воспроизводства).

В условиях сильной гетерогенности активных зон критическихборок (рис.7) возникает необходимость применения кодов, позволяющих воспроизводить точное описание геометрии и детальное представление энергетической зависимости характеристик нейтронных взаимодействий. Это позволяют делать коды, основанные на методе Монте-Карло (например, MCNP). В то же время для ряда задач даже при современном высоком уровне развития вычислительной техники достижение статистически надежных результатов сопряжено со значительными затратами вычислительного времени.

Данное обстоятельство становится критичным для решения тех задач, которые требуют проведения серийных многовариантных расчетов: сравнение групповых библиотек и файлов библиотек ОЯД на основании расчетов локальных функционалов, оценка погрешностей нейтронно-физических характеристик и пр. Выполненный в работе анализ всевозможных методов понижения дисперсии и их комбинаций, реализованных в коде MCNP (расщепление-рулетка по ячейкам и (или) по энергии, весовые окна, усечение по геометрии и (или) комбинации этих методов), показал, что для выполнения многовариантных расчетов за приемлемое время при условии достижения требуемой точности расчетных функционалов необходимо применение неаналоговых методов ускорения расчетов.

Задача состояла в поиске и обосновании метода повышения эффективности неаналогового расчета локальных функционалов в критических средах с сильной гетерогенностью, который не приводил к смещенной оценке функционала.

Сложность применения стандартных методов для решения конкретной задачи заключается в том, что большинство методов эффективны для решения задач с постоянным внешним источником (задачи радиационной защиты).

Эффективность расчета характеризуется показателем *FOM* (*figure of merit*), связывающим два конфликтующих показателя: время счета T и квадрат относительной ошибки оценки R^2 функционала ($FOM=1/(R^2 \cdot T)$). В коде MCNP *FOM* является одним из важнейших показателей надежности и эффективности оценки расчетных функционалов (скорость реакции, средний поток по ячейке и т.д.).

Был определен оптимальный алгоритм понижения дисперсии для выполнения расчетов на одноядерном процессоре, и было показано, что полученные времена счета могут быть уменьшены на порядки с привлечением многоядерных процессоров. Результаты проверялись на отсутствие смещений в сериях прямых расчетов с большой статистикой (на суперкомпьютере для распараллеленной версии MCNP) для различных последовательностей случайных чисел. Результаты расчетов, полученных с использованием методов понижения дисперсии, сравнивались с результатами прямого расчета с расчетной точностью ниже 1.5%, расхождения в результатах прямого и непрямого расчетов не превышали 1%.

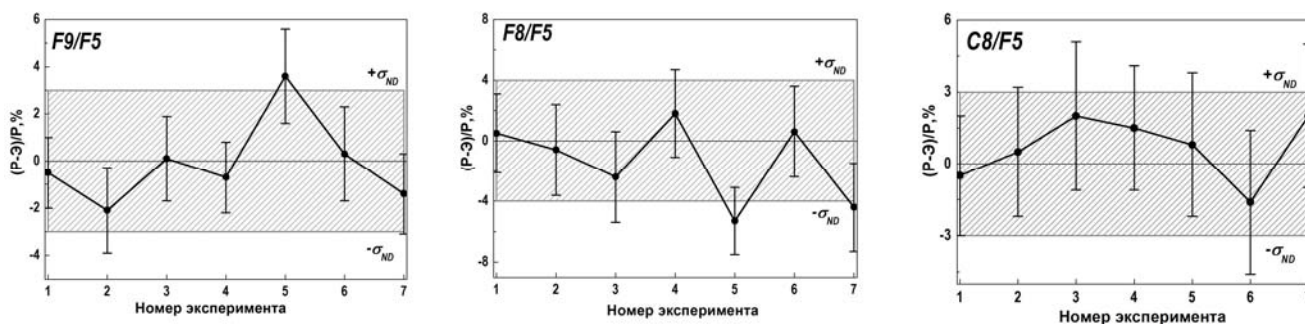


Рис.8. Расчетно-экспериментальные расхождения и константная погрешность отношений скоростей реакций¹¹, измеренных в центре активных зон сборок БФС моделей реакторов на быстрых нейтронах со смешанным уран-плутониевым топливом

Результаты выполненного анализа (рис.8) показали, что комбинация пространственного и энергетического расщеплений в методе весовых окон приводит к существенному повышению эффективности расчета и сокращению машинного времени от нескольких дней до нескольких часов при статистических ошибках в спектральных индексах ниже 2%.

§4.3 посвящён проблеме оценки точности предсказания доплеровского коэффициента реактивности (ДКР), важного для обоснования безопасности работы энергетического реактора на быстрых нейтронах. ДКР ($\Delta k_{eff}(T)/\Delta T$) определяется

¹¹ C8/F5 – отношение скоростей захвата ^{238}U к делениям ^{235}U ; F9/F5 – отношение скоростей деления ^{239}Pu к делениям ^{235}U ; F8/F5 – отношение скоростей деления ^{238}U к делениям ^{235}U .

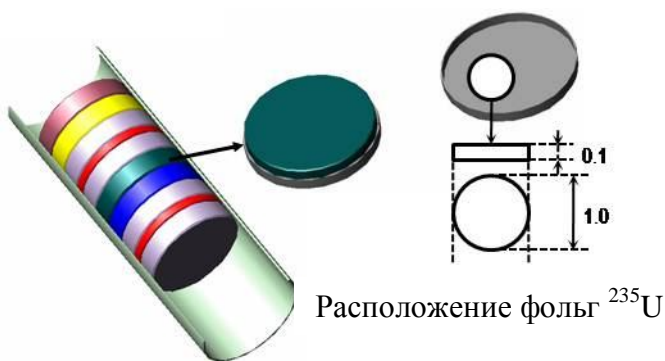


Рис.7. Расположение фольг в таблетках при измерениях отношения скоростей захватов ^{238}U к делениям ^{235}U (C8/F5) на сборках БФС

как изменение k_{eff} за счет доплер-эффекта при относительном изотермическом изменении температуры реактора. Доплер-эффект на делящихся ядрах приводит к росту средних сечений деления (положительный вклад в реактивность), а на ядрах ^{238}U – к увеличению сечения захвата (отрицательный вклад в реактивность). Погрешность расчета ДКР определяется погрешностью измерения нейтронных сечений в резонансной области энергий.

В работе проанализированы и оценены эксперименты по изучению ДКР, составляющие основу матрицы верификации тестовых моделей характеристик активных зон реактора типа БН. К ним относятся эксперименты по изучению реактивности нагретых образцов ^{238}U на сборках БФС, ZPPR-9 и на реакторе SEFOR.

Таблица 4. Усредненная погрешность реакторных функционалов для экспериментов на БФС с учетом неопределенностей в резонансных параметрах ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu

Реакторный функционал	Относительная погрешность, $\Delta f/f$, %			
	Расчетно-экспериментальные расхождения	Экспериментальная погрешность	Константная погрешность	Вклад резонансных параметров
$C8/F5$	1.5	2.5 ? 3	5	< 2
$F9/F5$	1.5	1.5 ? 2	3	
$F8/F5$	2	2.5 ? 3	4	
k_{eff}	0.1	0.3	2	< 0.2
ДКР	8	6	< 10*	8 ? 15

*) Константная погрешность в ДКР получена на основе экспертных оценок (тест МАГАТЭ)

На основании полученных нейтронных констант вычислена константная погрешность топливной составляющей ДКР тестовой модели гибридной зоны реактора типа БН детерминистическим и статистическим методами. Было продемонстрировано (табл. 4), что полученные константы не дают заметного вклада в погрешность тех функционалов, для которых неопределенности нейтронных сечений в резонансной области энергий не являются определяющими и уже были учтены в ковариационных матрицах погрешностей групповых констант на основе экспертных оценок. Напротив, для функционалов, вклад в оценку точности которых неопределенность резонансной области является определяющей, полученные константы позволяют количественно вычислить погрешность, оцениваемую ранее качественно исходя из приближенных оценочных расчетов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан и применен статистический метод восстановления узких резонансов, позволяющий определить значения резонансных параметров и их ковариационные матрицы погрешностей в условиях отсутствия экспериментальных данных. Применение данного метода позволило получить полный набор данных по резонансным параметрам и их погрешностей для основных топливных изотопов (^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu).

Доказательно и обоснованно расширена область резонансов ^{235}U в энергетическом диапазоне от 500 до 2000 эВ, что позволило существенно уменьшить различия между расчетом и экспериментом для систем с промежуточным спектром нейтронов. Это позволило представить аргументированное объяснение ряда эффектов, связанных с резонансной блокировкой нейтронных сечений, выявленных на стендах БФС. Выполнена оценка резонансных параметров ^{235}U в области разре-

шенных резонансов для Российской национальной библиотеки оцененных нейтронных данных РОСФОНД.

С использованием предложенного метода и разработанного комплекса программ сформированы ковариационные матрицы погрешностей резонансных параметров основных топливных изотопов (^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu). Созданный инструментарий позволил усовершенствовать национальную систему нейтронных констант посредством дополнения и уточнения резонансных данных и их ковариационных матриц погрешностей, а также сделать возможным применение данного подхода к другим изотопам.

2. Проведена серия тестовых расчетов для набора простых по геометрии бенчмарк-экспериментов и получены результаты оценки вкладов резонансных данных в константную погрешность расчета эффективного коэффициента размножения нейтронов и отношений скоростей реакций. Полученные результаты продемонстрировали корректность предложенного подхода к учету константной погрешности в расчетах нейтронно-физических характеристик и позволяют повысить точность расчетных предсказаний.

3. Рассчитаны ковариационные матрицы погрешностей факторов резонансной блокировки групповых сечений взаимодействия нейтронов для основных топливных изотопов (^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu) для 28- и 299-групповых версий библиотеки нейтронных констант БНАБ-РФ. На основании полученных данных выполнена оценка экспериментов по измерению функций пропускания и самоиндикации с количественным анализом всех источников погрешностей расчетов. Предложены алгоритмы учета данных дифференциальных экспериментов для уточнения ковариационных матриц погрешностей нейтронных сечений в резонансной области энергий.

Разработанные программные коды по получению и учету ковариационных данных погрешностей нейтронных взаимодействий в групповом и детальном представлении позволяют выполнять корректные оценки константной погрешности нейтронно-физических функционалов с использованием различных библиотек ОЯД.

4. Полученные результаты (оценки константной погрешности интегральных экспериментов по критичности, скоростям реакций и др.) на основе предложенного статистического подхода с использованием разработанного комплекса программ оценки погрешностей прецизионных расчетов нейтронно-физических характеристик продемонстрировали корректность созданного инструментария и возможность его применения для проведения подобных оценок для других реакторных функционалов и систем.

5. Выполнена оценка точности интегральных экспериментов по изучению основных проектных характеристик активных зон реакторов на быстрых нейтронах и вычислены константные погрешности расчета для эффективного коэффициента размножения, температурного доплеровского коэффициента реактивности, отношений скоростей реакций и распределений скоростей деления. Проведенный анализ расчетно-экспериментальных расхождений совместно с оценкой расчетных погрешностей, полученных на базе Российской национальной библиотеки оцененных нейтронных данных РОСФОНД, позволил корректно определить и повысить точность предсказания характеристик реакторов на быстрых нейтронах.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи в научных рецензируемых журналах из списка ВАК РФ

1. **Андрианова О.Н.**, Головки Ю.Е., Жердев Г.М. и др. Тестирование ковариационных матриц погрешностей системы констант БНАБ// Известия вузов. Ядерная энергетика. – Обнинск – 2014. – №2. – с. 109-117.
2. **Андрианова О.Н.**, Перегудов А.А., Мантуров Г.Н. и др. Использование метода GRS для оценки погрешности нейтронно-физических характеристик перспективного быстрого реактора // Известия вузов. Ядерная энергетика. – Обнинск – 2014. – №2. – с. 90-98.
3. **Андрианова О.Н.**, Головки Ю.Е., Якунин А.А. Верификация библиотеки констант БНАБ-РФ на модельных задачах и специально отобранных бенчмарк-экспериментах// Ядерная физика и инжиниринг. Безопасность ядерных реакторов – Москва – 2012. – т. 3. – № 2. – с. 120–126.
4. Николаев М.Н., **Павлова (Андрианова) О.Н.** Восстановление пропущенных резонансов урана-235 в области энергий 500-2500 эВ// ВАНТ Серия: Ядерные константы. – Обнинск. – 2006. – Вып. 1–2. – с. 70–79.
5. Грабежной В.А., Дулин В.В., Михайлов Г.М., **Павлова (Андрианова) О.Н.** Определение глубокоподкритических состояний размножающих сред методом α -Росси// Атомная энергия. – Москва – 2006. – т. 101. – вып. 2. – с. 140–148.
6. Дулин В.А., **Павлова (Андрианова) О.Н.** К вопросу о резонансной самоэкранировке сечений захвата и деления урана-235 // Известия вузов. Ядерная энергетика. – Обнинск – 2006. – №2. – с. 75-84.

Публикации, проиндексированные в базах данных WoS и Scopus

1. **Andrianova O.**, Peregudov A., Raskach K., et al. Application of the GRS method for estimation of uncertainties of LMFBR type reactor physics parameters with taking into account macroscopic experiments // Proc. of Intern. Conf. PHYSOR 2014 – The Role of Reactor Physics Toward a Sustainable Future. The Westin Miyako, Kyoto, Japan, September 28 – October 3, 2014. (Scopus)
2. **Andrianova O.**, Peregudov A., Raskach K., et al. GRS Method for Uncertainties Evaluation of Parameters in a Perspective Fast Reactor // Nuclear Data Sheets. – 2014. – Vol. 118. – p. 548–550. (Scopus)
3. **Andrianova O.**, Peregudov A., Raskach K., et al. Application of GRS method to evaluation of uncertainties of calculation parameters of perspective sodium-cooled fast reactor, (2013) EPJ Web of Conferences, 42, art. no. 07002. (Scopus)
4. **Andrianova O.**, Peregudov A., Raskach K., et al. Application of GRS method to evaluation of uncertainties of calculation parameters of perspective sodium-cooled fast reactor/ 3rd International Workshop on Nuclear Data Evaluation for Reactor Applications/ Aix en Provence, France, Sep. 25-28, 2012/ Book Series: EPJ Web of Conferences, Volume: 42, Article Number: UNSP 07002, Published: 2013. (WoS)
5. **Andrianova O.**, Peregudov A., Raskach K., Tsibulya A. Application of GRS Method to Evaluation of Uncertainties of Calculation Parameters of Perspective So-

dium-Cooled Fast Reactor // Proc. Int. Conf. on Reactor Physics PHYSOR 2012. Knoxville, TN, USA, April 15-20, 2012. (Scopus)

6. Grabeznoi V.A., Dulin V.V., Mikhailov G.M., **Pavlova (Andrianova) O.N.** α -rossi determination of deeply subcritical states of multiplying media/ Atomic Energy. 2006. T. 101. № 2. p. 593-601. DOI: 10.1007/s10512-006-0136-y. (WoS)

Материалы конференций

1. **Andrianova O.N.**, Pregudov A.A., Tepluhina Ye.S., et al. Criticality uncertainty analysis with randomly sampled nuclear data// International Conference on Nuclear Criticality Safety, ICNC 2011, Edinburgh, Scotland, 19–22 September 2011. – p. 376–384.
2. **Андрианова О.Н.**, Кощев В.Н. Влияние неопределенностей резонансной структуры нейтронных сечений в файлах оцененных данных на факторы резонансной самоэкранировки// XXII-й всероссийский межведомственный семинар «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики с замкнутым топливным циклом (НЕЙТРОИКА 2011)», г. Обнинск, 25-28 октября 2011.
3. **Андрианова О.Н.**, Головки Ю.Е., Якунин А.А. Результаты первого этапа верификации библиотеки констант БНАБ-РФ// Тезисы докладов на XV-ой школе-семинаре НИЯУ МИФИ по проблемам физики реакторов «Волга 2010», г. Тверь, 3-7 сентября 2010.
4. **Pavlova (Andrianova) O.**, Rozhikhin Y., Tsiboulia A. Use of Monte Carlo Simulation for Computational Analysis of Critical Systems on IPPE's Facility Addressing Needs of Nuclear Safety// International Youth Nuclear Congress proceedings, IYNC 2008, Interlaken, Switzerland, September 20 – 26, 2008. –V. 3. – p. 128–132.
5. **Pavlova (Andrianova) O.**, Rozhikhin Y., Semenov M., et al. Calculational Analysis of Critical Experiments Simulating Damp MOX Powders. // Proc. Int. Conf. on Nuclear Criticality Safety , ICNC 2007, St. Petersburg, Russia, May 28 – June 1, 2007. –V. 1. –p. 273–382.
6. Grigoriev Y.V., Kitaev V.Ya., **Pavlova (Andrianova) O.N.**, et al. Investigation of Energy Dependent of ^{235}U Value α in the Resolved Resonance Region // Proc. XIV International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, Proceedings of the Seminar, Dubna, Russia, May 25–28, 2006. – p. 233–240.

Андрианова Ольга Николаевна
АВТОРЕФЕРАТ

Компьютерная верстка и выпуск оригинал-макета – Андрианов А.А.

Подписано в печать с оригинал-макета __.__.2015 г.

Бумага офисная 80 г/см², формат 21x29,7 ?.

Гарнитура Times, печать – офсетная.

Усл. печ. л. 1, уч. изд. л. 1 тираж 100 экз. №

