

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

На правах рукописи



Писарев Александр Николаевич

**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ
ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ТОПЛИВА В РАСЧЕТАХ ВЫГОРАНИЯ**

Специальность: 2.4.9.

«Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная
безопасность»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»).

Научный руководитель: **Колесов Валерий Васильевич**, кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории физики топливных циклов и трансмутаций Курчатовского комплекса перспективной атомной энергетики НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

Официальные оппоненты: **Ельшин Александр Всеволодович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела нейтронно-физических исследований Научно-исследовательского технологического института имени А.П. Александрова (ФГУП «НИТИ имени А.П. Александрова»), г. Сосновый Бор;

Жердев Геннадий Михайлович, кандидат физико-математических наук, главный специалист подразделения управления обеспечения единства измерений Института технического регулирования, обеспечения единства измерений и стандартизации Росатома (ЧУ «Атомстандарт»), г. Москва.

Ведущая организация: Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», г. Обнинск.

Защита диссертации состоится 11 февраля 2025 г., начало в 14:00, на заседании диссертационного совета 02.1.003.04 на базе НИЦ «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 « _ » _____ 2024 г

Ученый секретарь

диссертационного совета 02.1.003.04
кандидат физико-математических наук



Д.А. Шкаровский

© Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 2024

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Повышение точности расчета изотопного состава топлива при выгорании необходимо для обеспечения мер безопасности, которые напрямую связаны с такими факторами, как образование газообразных продуктов деления, запаздывающих нейтронов, критичность и остаточное тепловыделение. Также это способствует более точному прогнозированию глубины выгорания, особенно в случаях, когда речь идет о больших глубинах. Ужесточение требований к эксплуатационным характеристикам требует более точного прогнозирования параметров как проектируемых, так и действующих реакторных установок.

После облучения топлива в реакторе его изотопный состав обычно определяют с помощью анализа, а не путем измерения. Регулярное измерение содержания изотопов в выгружаемом топливе с помощью химических анализов не является целесообразным из-за проблем, связанных с радиационными эффектами облучения людей, безопасностью и стоимостью. Для десятков тысяч сборок проведение систематических измерений невозможно, поэтому моделирование выгорания топлива приобретает решающее значение. Нейтронно-физические расчеты, использующие различные библиотеки ядерно-физических данных, позволяют получить более полные данные для значимых нуклидов, включая диапазоны концентраций.

В современных файлах данных доступно большое количество ядерных данных, однако их точность и достоверность остаются под вопросом. Анализ отечественных и зарубежных библиотек показывает, что необходимо значительно улучшить качество оцененных ядерных данных, особенно для тех нуклидов, количество которых значительно увеличивается по сравнению с существующими реакторами при более высоком выгорании топлива и внедрении технологий замкнутого топливного цикла.

Основной задачей всех библиотек является реалистичная оценка погрешностей в рекомендуемых ядерных данных. От точности этой оценки зависят

корректность расчетных реакторных функционалов и, соответственно, уровень безопасности, закладываемый в проекты. Если погрешности будут занижены, это может привести к снижению безопасности, а если завышены – к экономическим потерям.

Перенос ошибок в ядерных данных играет все более важную роль при моделировании нейтронно-физических процессов в ядерных реакторах. Учет неопределенности ядерных данных позволяет определить границы достоверности для макроскопических параметров, которые используются при проектировании и обеспечении безопасности ядерных систем.

Исследования в области ядерных данных приносят значительную экономическую выгоду. Затраты на эти исследования составляют лишь незначительную часть от общей стоимости реализации ядерных технологий. Однако использование достоверных ядерных данных с обоснованной погрешностью позволяет существенно сократить дорогостоящие запасы в проектах и с высокой точностью прогнозировать ядерную безопасность и экологическую приемлемость создаваемых объектов. Чем более точными являются используемые константы, тем более надежными становятся прогнозы и тем ниже становится общая стоимость реализации проектов.

Прецизионные расчеты выгорания особенно актуальны при анализе ядерной и радиационной безопасности объектов с ОЯТ, а также при использовании новых топливных композиций в реакторах нового поколения. Неотъемлемой частью исследований, направленных на обоснование ядерной безопасности реакторных установок, является оценка погрешностей как исходных данных, так и конечных результатов. Некорректный учет погрешностей в исходных данных может привести к серьезным проблемам, таким как недооценка эффективности рабочих органов системы управления и защиты, неправильное определение запасов реактивности в различных состояниях реактора и другие негативные последствия. Сложность получения экспериментальных данных об изотопном составе облученного топлива требует применения современных математических методов для решения задач изотопной кинетики. Эти методы должны гарантировать

допустимую погрешность результатов и разработку специализированных бенчмарк-расчетов.

Количественная оценка неопределенностей ядерных концентраций в расчетах выгорания позволит более точно прогнозировать изотопный состав топлива, что важно для оптимизационных задач трансмутации, рециркуляции и удаления отходов.

Показатели трансмутации существенно зависят от ядерных данных, поэтому важно количественно оценить результирующие неопределенности в интегральных параметрах быстрых реакторных систем. Это связано с тем, что топливо таких реакторов может содержать значительное количество минорных актинидов, таких как америций и кюрий, сечения (скорости реакций) которых плохо известны.

Знание изотопного состава топлива во время работы реактора необходимо для оценки долговременной радиотоксичности, остаточного тепловыделения отработавшего топлива, изменений запаса реактивности, а также для контроля роста давления газа и концентрации летучих продуктов деления, которые формируют источник выброса в аварийных ситуациях. При транспортировке и хранении отработавшего топлива важное значение имеют как точный расчет полного остаточного тепловыделения, так и неопределенность в $k_{эфф}$. Решение задач выгорания топлива необходимо для оценки накопления различных изотопов, образующихся в реакторных установках, таких как изотопы плутония и медицинские радиоизотопы, например, молибден-99. При этом в большинстве случаев достаточно сложно экспериментально определить их концентрации в отработавшем топливе.

Таким образом, в настоящее время большое значение имеют численные методы решения задач выгорания. С другой стороны, неопределенности в оцененных скоростях реакций, потоке нейтронов и других величинах могут привести к значительным искажениям полученных результатов, поэтому важно уметь определить влияние таких неопределенностей на ядерные концентрации нуклидов в процессе выгорания топлива.

Цель работы – разработка и обоснование методики для оценки погрешностей ядерных концентраций актинидов в задачах изотопной кинетики в зависимости от погрешностей входных данных, таких как однокрупные нейтронные сечения и плотность потока нейтронов для реакторных установок различного типа.

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

– проведена верификация программного комплекса VisualBurnOut применительно к моделированию изотопной кинетики на основе бенчмарк-теста и модельных задач (аналитическое решение, статистический подход);

– проведена адаптация программного комплекса VisualBurnOut для создания методики оценки погрешностей констант, необходимых для достижения гарантированных погрешностей в оценках ядерных концентраций актинидов в процессе кампании;

– создание программы для организации комплексных нейтронно-физических расчетов и расчета выгорания топлива;

– выполнены оценки константной составляющей погрешности в расчетах ядерных концентраций актинидов для действующих и перспективных моделей ТВС водо-водяных реакторов;

– определены требования к точности ядерных данных, что позволяет получить гарантированные оценки погрешностей ядерных концентраций актинидов на конец кампании действующих и перспективных моделей ТВС водо-водяных реакторов.

Положения работы, выносимые на защиту

1. Программный комплекс ABC для организации комплексных нейтронно-физических расчетов и расчетов выгорания ядерного топлива.

2. Методика оценки погрешностей ядерных концентраций актинидов в задачах изотопной кинетики в зависимости от погрешностей входных данных: однокрупные нейтронные сечения и плотность потока нейтронов.

3. Оценка погрешностей ядерных концентраций актинидов при расчетах кампании для моделей ТВС реакторов ВВЭР-СКД и ВВЭР-1200.

4. Оценка требований к точности ядерных данных для получения гарантированных оценок погрешностей в ядерных концентрациях актинидов в задачах изотопной кинетики для моделей ТВС реакторов ВВЭР-СКД и ВВЭР-1200.

Научная новизна работы

– Разработана методика на основе программного комплекса VisualBurnOut для моделирования задач выгорания и оценки погрешностей ядерных концентраций нуклидов для различных типов реакторов.

– Впервые для моделей ТВС реакторов ВВЭР-СКД и ВВЭР-1200 были получены оценки погрешностей ядерных концентраций актинидов на конец кампании.

– Впервые для моделей ТВС реакторов ВВЭР-СКД и ВВЭР-1200 были получены оценки погрешностей однокрупных сечений ядерных реакций, позволяющие получить гарантированные оценки наработки актинидов на конец кампании.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов, полученных с помощью программного комплекса VisualBurnOut, подтверждается их хорошей согласованностью с результатами, рассчитанными по другим программам, моделирующим процесс выгорания топлива: SERPENT, KENO, MONTEBURNS, а также сравнением рассчитываемых погрешностей с результатами, полученными с использованием статистического подхода и на модельных задачах, допускающих аналитическое решение. Кроме того, результаты расчета погрешностей, полученные с помощью VisualBurnOut, были сопоставлены с данными, полученными статистическим методом и на модельных задачах, которые допускают аналитическое решение.

Практическая значимость работы

1. Методика может быть использована для оценки погрешностей в ядерных концентрациях различных нуклидов при разработке перспективных реакторных установок.

2. Методика может быть использована для оценки потребностей в уточнении ядерных данных, необходимых для проведения нейтронно-физических расчетов.

Апробация работы

Материалы, представленные в диссертации, были доложены на 6 международных конференциях и межведомственных мероприятиях:

1. XIII-ая международная научно-практическая конференция «БУДУЩЕЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ», Обнинск, 2017;

2. XV-ая международная научно-практическая конференция «БУДУЩЕЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ», Обнинск, 2019;

3. XVI-ая Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа, Москва, 2019;

4. XVI-ая международная научно-практическая конференция «БУДУЩЕЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ», Обнинск, 2020;

5. Международная молодежная школа-конференция по ядерной физике и технологиям (International School on Nuclear Physics and Engineering NPhE-2020);

6. 31-ая Всероссийская научно-техническая конференция «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики» («Нейтроника-2022»), Обнинск, 2022.

Публикации

По теме диссертации опубликованы 5 статей в рецензируемых научных изданиях, 4 из которых статьи в журналах, рекомендованных ВАК. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора

Диссертационная работа содержит расчетные и прикладные результаты, полученные автором в период с 2018 по 2024 год. Автор лично выполнил поиск в открытых публикациях, анализ и обобщение информации по теме исследования. Основная часть научных результатов, связанных с положениями, выносимыми на защиту, получена автором лично. В случае совместных работ, относящихся к этим положениям, автору принадлежала ведущая роль. В работах прикладного характера, связанных с использованием разработанных методов, автор принимал участие в постановке задачи, расчетах и анализе результатов. Методика оценки

погрешностей ядерных концентраций нуклидов от погрешностей одногрупповых сечений и плотности потока нейтронов в задачах изотопной кинетики для различных реакторных установок разработана лично автором. Основные результаты, полученные автором, заключаются в следующем.

- Разработана программа-связка ABC на языке программирования Python, предназначенная для организации нейтронно-физических расчетов и расчета выгорания ядерного топлива с учетом возможных погрешностей исходных данных.

- Проведены верификационные расчеты и обоснованы методики, используемые в программном комплексе VisualBurnOut для оценки константной составляющей погрешности НФХ в расчетах выгорания.

- Получены оценки константной составляющей погрешности результатов расчета выгорания для простой модели ячейки реактора PWR.

- Получены оценки константной составляющей погрешности результатов расчета выгорания для моделей ТВС реакторов ВВЭР-СКД и ВВЭР-1200.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 110 наименований и двух приложений, содержит 128 страниц, 28 таблиц и 16 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформирована ее цель и поставлены задачи для достижения цели, приведена информация о научной новизне, описана практическая значимость и достоверность полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту, приведена информация об основных публикациях по теме работы.

В первой главе рассмотрены имеющиеся программные комплексы для решения задачи выгорания топлива, приведен литературный обзор работ по оценке влияния погрешностей ядерных данных на расчетные параметры реакторной установки и методов их получения. Как оказалось, в России выполнено довольно мало работ, посвященных исследуемой тематике.

Анализ литературных источников позволяет сделать следующие выводы:

1) Большинство программных кодов для расчета выгорания не имеют возможности оценки погрешностей расчетных величин.

2) Большинство исследований сосредоточено на изучении влияния неопределенностей в ядерных данных на стандартные параметры, такие как эффективный коэффициент размножения, эффекты реактивности, плотность потока нейтронов и другие.

Описаны два различных подхода к оценке константной погрешности. Первый метод основывается на использовании коэффициентов чувствительности расчетных характеристик к исходным данным. Второй метод предполагает статистическое моделирование коррелированных наборов исходных расчетных данных с последующей статистической обработкой полученных результатов. Показаны их преимущества и недостатки.

Во второй главе описана методика, которая позволяет оценить точность расчета ядерных концентраций актинидов в задачах изотопной кинетики в зависимости от погрешностей исходных данных. Также в этой главе рассказывается о программных модулях, на которых основана данная методика.

На рисунке 1 изображена схема методики оценки погрешности ядерных концентраций нуклидов. Она включает в себя следующие основные этапы:

1. Получение непрерывно зависящих от энергии сечений и связанных с ними величин на основе оцененных ядерных данных с помощью программного комплекса NJOY;
2. Нейтронно-физический расчет по программе MCNP;
3. Расчет выгорания ядерного топлива по программе VisualBurnOut с учетом погрешностей входных данных;
4. Повторение пункта 2 и 3 необходимое количество раз с помощью программы ABC;
5. Решение задачи минимизации с помощью программы SNOPT.

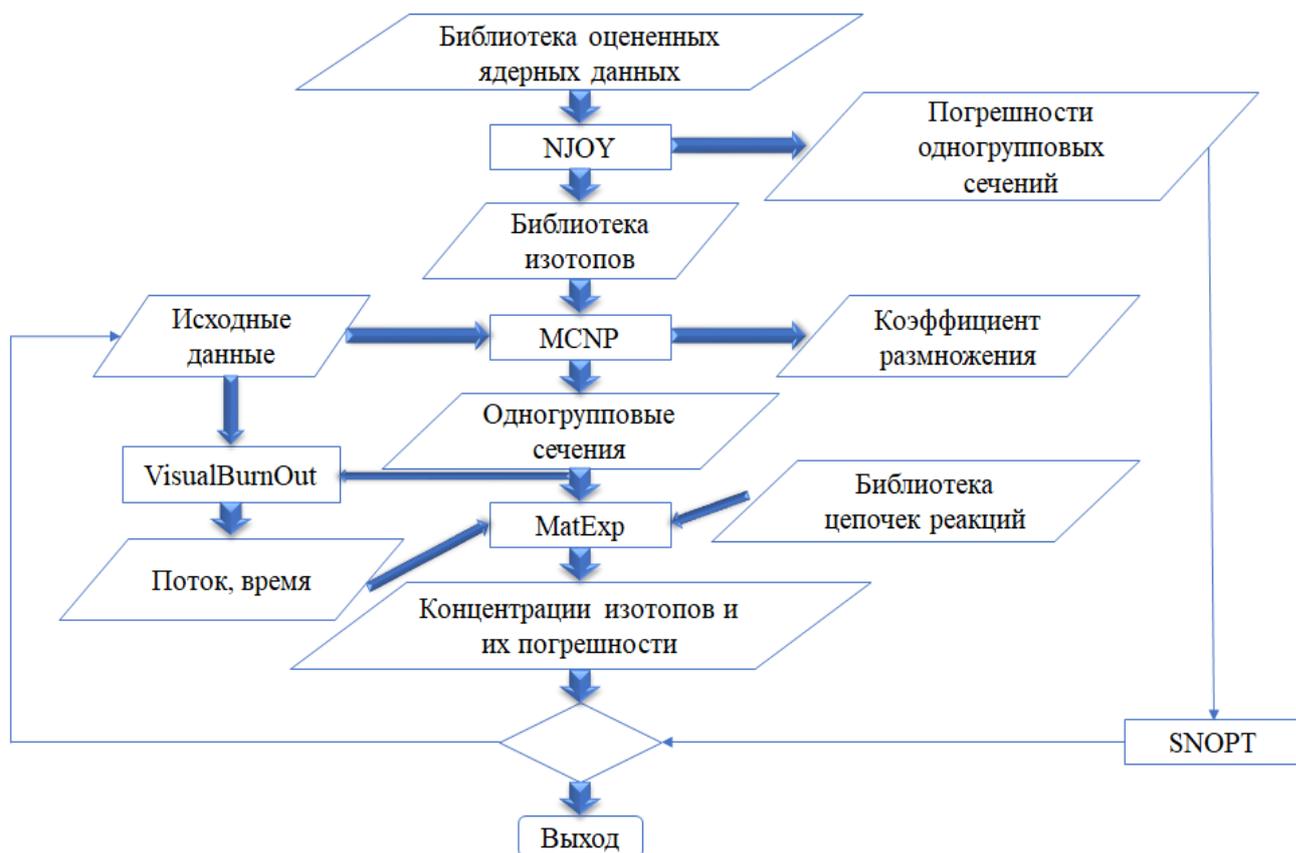


Рисунок 1 – Определение константной погрешности расчета ядерных концентраций нуклидов

Для проведения комплексных нейтронно-физических расчетов и расчета выгорания ядерного топлива была разработана программа-связка под названием «Объединенный комплекс автоматизированных расчетов выгорания топлива

(ABC)». Эта программа представляет собой единый интерфейс, который объединяет две другие программы – MCNP и VisualBurnOut. Основная задача ABC заключается в автоматическом преобразовании выходных данных из MCNP в задания для расчетов в VisualBurnOut и сохранении полученных результатов.

Для определения погрешностей в ядерных концентрациях нуклидов в VisualBurnOut реализован подход, суть которого заключается в том, что проводятся два расчета: один расчет со входным параметром плюс среднеквадратичное отклонение, второй со входным параметром минус среднеквадратичное отклонение. Получается два значения ядерных концентраций для всех нуклидов. Разность между ними дает нам величину, в точности совпадающую со среднеквадратичным отклонением, полученным в статистическом подходе.

Для верификации расчетов погрешностей были проведены сравнительные расчеты ядерных концентраций и их среднеквадратичных отклонений в процессе выгорания для модельной задачи, обусловленных среднеквадратичным отклонением в плотности потока нейтронов (среднеквадратичное отклонение, равное 3%) и в сечении реакции захвата ^{240}Pu , с использованием аналитических формул и метода вариации исходных данных программы VisualBurnOut.

Наблюдается практически полное совпадение результатов, полученных с использованием обоих методов, как в расчетах ядерных концентраций, так и в расчетах их среднеквадратичных отклонений.

В третьей главе приводятся результаты оценки погрешностей ядерных концентраций нуклидов с использованием программного комплекса VisualBurnOut для ячейки реактора PWR, используемой в качестве международного бенчмарка. Осуществлена верификация программного комплекса VisualBurnOut. Результаты расчета выгорания хорошо согласуются с другими работами.

Проведено исследование влияния состава свежего топлива и спектра нейтронов на погрешности в ядерных концентрациях нуклидов, которые обусловлены погрешностью в плотности потока нейтронов, равной 3%.

В таблице 1 представлены среднеквадратичные отклонения в ядерных концентрациях для трех глубин выгорания. Погрешность для ^{238}U очень мала

(0.01%) и постоянна при выгорании, поскольку его концентрация существенно не изменяется по сравнению с исходной концентрацией. Для минорных актинидов погрешности, в основном, составляют менее 5%, как и ожидалось, эти погрешности для некоторых нуклидов значительно выше, чем для урана и плутония. Для наиболее важных актинидов погрешности находятся в диапазоне от 1 до 3%. Практически все значимые изотопы кюрия имеют погрешности в ядерных концентрациях в диапазоне 0.50-1.00%.

Наблюдается тенденция превышения среднеквадратичных отклонений ядерных концентраций актинидов для UO_2 -топлива по сравнению с MOX-топливом. Исключение составляют концентрации ^{233}U , ^{239}Pu , ^{242}Am . Из этих данных видно, что рассмотренное изменение типа топлива приводит к изменению погрешностей ядерных концентраций нуклидов.

В большинстве случаев с увеличением выгорания разница между погрешностями в ядерных концентрациях для UO_2 - и MOX-топлива уменьшается.

Ужесточение спектра нейтронов для MOX-топлива не влияет на характер зависимости среднеквадратичных отклонений ядерных концентраций от глубины выгорания. Разница заключается лишь в численном значении погрешности на конец кампании, причем в ту или иную сторону. Для большинства актинидов наблюдается тенденция к уменьшению погрешностей при переходе от теплового к быстрому нейтронному спектру. Для изотопов урана, нептуния и плутония наблюдается обратный эффект, за исключением ^{232}U , ^{234}U , ^{236}Pu , ^{239}Pu и ^{242}Pu .

Выполнена проверка влияния количества расчетных точек выгорания на погрешности ядерных концентраций нуклидов. Среднеквадратичные отклонения в ядерных концентрациях нуклидов представлены в таблице 2. Обнаружено, что среднеквадратичное отклонение в ядерных концентрациях нуклидов в рассматриваемом диапазоне исследования влияния количества шагов убывает по закону $2^{1/2}$. Это справедливо для относительно небольшого количества шагов. При увеличении числа шагов среднеквадратичные отклонения ядерных концентраций выходят на асимптотику.

Таблица 1 – Сравнение среднеквадратичных отклонений ядерных концентраций для двух видов топлива и трех спектров

Нуклид	Среднеквадратичные отклонения в ядерных концентрациях, %								
	PWR, MOX (МВт·сут/кг)			PWR, UO ₂ (МВт·сут/кг)			PWR, MOX fast (МВт·сут/кг)		
	16	32	48	16	32	48	16	32	48
²³² U	0,73	0,52	0,38	0,84	0,59	0,45	0,64	0,41	0,27
²³³ U	0,60	0,29	0,15	0,57	0,27	0,13	0,58	0,30	0,16
²³⁴ U	0,18	0,20	0,20	0,18	0,27	0,32	0,10	0,10	0,10
²³⁵ U	0,21	0,35	0,49	0,36	0,50	0,64	0,27	0,41	0,55
²³⁶ U	0,73	0,50	0,36	0,66	0,48	0,38	0,74	0,52	0,40
²³⁷ U	2,87	2,85	2,84	2,98	2,90	2,86	2,85	2,85	2,85
²³⁸ U	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
²³⁶ Np	0,76	0,37	0,19	0,78	0,39	0,21	0,77	0,41	0,26
²³⁷ Np	0,50	0,31	0,20	0,59	0,36	0,22	0,50	0,31	0,22
²³⁸ Np	3,13	3,03	2,98	3,18	3,04	2,98	3,12	3,03	3,01
²³⁹ Np	2,99	2,99	2,99	2,99	2,99	2,99	2,99	2,99	2,99
²³⁶ Pu	0,75	0,63	0,60	1,30	0,86	0,67	0,74	0,59	0,54
²³⁸ Pu	0,16	0,20	0,14	0,88	0,52	0,37	0,22	0,26	0,19
²³⁹ Pu	0,29	0,33	0,28	0,29	0,10	0,10	0,04	0,04	0,04
²⁴⁰ Pu	0,33	0,19	0,12	0,55	0,27	0,13	0,41	0,31	0,28
²⁴¹ Pu	0,58	0,26	0,11	0,81	0,34	0,17	0,57	0,35	0,23
²⁴² Pu	0,85	0,56	0,42	1,19	0,67	0,48	0,69	0,53	0,39
²⁴¹ Am	0,29	0,37	0,50	0,40	0,42	0,54	0,24	0,24	0,24
^{242m} Am	0,55	0,20	0,22	0,62	0,25	0,28	0,59	0,29	0,18
²⁴² Am	2,88	2,84	2,82	2,86	2,79	2,76	2,92	2,91	2,92
²⁴³ Am	1,00	0,64	0,46	1,43	0,78	0,52	0,82	0,58	0,44
²⁴⁴ Am	3,63	3,32	3,18	4,05	3,44	3,24	3,46	3,26	3,16
²⁴² Cm	1,15	0,91	0,81	1,30	0,95	0,83	1,11	0,90	0,82
²⁴³ Cm	1,29	0,76	0,50	1,58	0,86	0,56	1,21	0,74	0,54
²⁴⁴ Cm	1,20	0,82	0,63	1,68	0,98	0,71	1,03	0,71	0,57
²⁴⁵ Cm	1,34	0,85	0,58	1,89	1,01	0,66	1,14	0,71	0,54
²⁴⁶ Cm	1,63	1,11	0,87	2,20	1,29	0,96	1,43	0,94	0,75
²⁴⁷ Cm	1,81	1,19	0,91	2,45	1,40	1,03	1,61	1,00	0,77
²⁴⁸ Cm	2,03	1,34	1,05	2,71	1,57	1,17	1,82	1,12	0,88
²⁴⁹ Cm	4,71	3,98	3,68	5,44	4,22	3,80	4,46	3,74	3,50
²⁵⁰ Cm	3,85	2,68	2,19	4,83	3,08	2,42	3,51	2,31	1,83
²⁴⁹ Bk	2,26	1,43	1,08	2,97	1,65	1,18	2,08	1,29	1,02
²⁵⁰ Bk	4,99	4,16	3,84	5,74	4,40	3,96	4,77	3,98	3,71
²⁴⁹ Cf	1,09	0,56	0,50	1,57	0,68	0,56	1,00	0,47	0,36
²⁵⁰ Cf	2,37	1,43	1,05	3,08	1,64	1,13	2,18	1,27	0,95
²⁵¹ Cf	2,50	1,43	1,00	3,21	1,64	1,08	2,30	1,24	0,87
²⁵² Cf	2,81	1,74	1,36	3,51	1,95	1,44	2,58	1,50	1,13

Таблица 2 – Среднеквадратичные отклонения ядерных концентраций нуклидов в зависимости от количества расчетных точек выгорания при 3%-ой погрешности плотности потока

Нуклид	Количество расчетных точек выгорания				
	176	88	44	22	11
	Среднеквадратичные отклонения ядерных концентраций, %				
²³² U	0,30	0,32	0,38	0,52	0,82
²³³ U	0,12	0,13	0,15	0,20	0,35
²³⁴ U	0,16	0,17	0,20	0,30	0,35
²³⁵ U	0,39	0,41	0,49	0,66	1,05
²³⁶ U	0,29	0,30	0,36	0,49	0,79
²³⁷ U	2,25	2,37	2,84	4,12	5,55
²³⁸ U	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
²³⁶ Np	0,15	0,16	0,19	0,29	0,33
²³⁷ Np	0,16	0,17	0,20	0,30	0,32
²³⁸ Np	2,37	2,48	2,98	4,35	5,71
²³⁹ Np	2,37	2,49	2,99	4,08	6,15
²³⁶ Pu	0,48	0,50	0,60	0,89	1,06
²³⁸ Pu	0,11	0,12	0,14	0,23	0,26
²³⁹ Pu	0,22	0,23	0,28	0,44	0,52
²⁴⁰ Pu	0,10	0,10	0,12	0,16	0,27
²⁴¹ Pu	0,09	0,09	0,11	0,15	0,26
²⁴² Pu	0,33	0,35	0,42	0,57	0,87
²⁴¹ Am	0,40	0,42	0,50	0,77	0,95
^{242m} Am	0,17	0,18	0,22	0,35	0,41
²⁴² Am	2,24	2,35	2,82	3,76	5,68
²⁴³ Am	0,37	0,38	0,46	0,69	0,90
²⁴⁴ Am	2,52	2,65	3,18	4,61	6,31
²⁴² Cm	0,64	0,68	0,81	1,19	1,58
²⁴³ Cm	0,40	0,42	0,50	0,70	1,01
²⁴⁴ Cm	0,50	0,53	0,63	0,85	1,28
²⁴⁵ Cm	0,46	0,48	0,58	0,84	1,13
²⁴⁶ Cm	0,69	0,73	0,87	1,25	1,71
²⁴⁷ Cm	0,72	0,76	0,91	1,22	1,90
²⁴⁸ Cm	0,83	0,88	1,05	1,41	2,22
²⁴⁹ Cm	2,92	3,07	3,68	5,29	7,22
²⁵⁰ Cm	1,74	1,83	2,19	3,22	4,19
²⁴⁹ Bk	0,86	0,90	1,08	1,26	2,30
²⁵⁰ Bk	3,05	3,20	3,84	5,32	7,78
²⁴⁹ Cf	0,40	0,42	0,50	0,69	1,03
²⁵⁰ Cf	0,83	0,88	1,05	1,45	2,15
²⁵¹ Cf	0,79	0,83	1,00	1,47	1,92
²⁵² Cf	1,08	1,13	1,36	1,89	2,79

Для оценки погрешностей в ядерных концентрациях нуклидов, обусловленных неопределенностью нейтронных констант, необходимо было провести сравнение с расчетами по другим программам и провести анализ

погрешностей за счет неопределенностей в константах с использованием разработанной методики.

В таблице 3 представлено сравнение погрешностей для некоторых актинидов с данными работ для той же ячейки PWR, в которых использовались разные методы оценки константной компоненты погрешностей концентраций. Существуют различия между расчетами: глубина выгорания, ковариационные матрицы сечений. Результаты настоящей работы и работы в большинстве случаев согласуются с точностью до 2 раз, за исключением ^{239}Np , ^{235}U , ^{237}U , ^{243}Am и ^{244}Cm в MOX-топливе и ^{234}U , ^{237}U для UO_2 -топлива. Для ^{235}U , поскольку этот изотоп присутствует в начале цикла, разница в погрешностях в конце цикла должна происходить либо из-за ковариаций ядерных данных (выбор библиотеки оцененных ядерных данных), различий в выгорании, либо из-за различий методов оценки константной компоненты погрешностей концентраций. Также по результатам расчетов можно сделать вывод о том, что значимые различия в получаемых результатах могут быть не только между различными библиотеками, но и между разными версиями одной библиотеки, что объясняется накоплением новых экспериментальных данных и уточнением имеющихся оцененных ядерных данных.

Проведены расчеты коэффициентов чувствительности ядерных концентраций к различным сечениям. Получены одногрупповые относительные погрешности сечений реакций, обусловленные неопределенностями констант из библиотеки JEFF-3.3 для всех актинидов, начиная с урана, с учетом ковариационных матриц для реального спектра при выгорании UO_2 - и MOX-топлива в ячейки PWR.

Для модели ячейки PWR нет серьезных краткосрочных потребностей с точки зрения уменьшения неопределенностей ядерных данных (микроскопических сечений), так как погрешности в ядерных концентрациях наиболее значимых актинидов не превышают 5%.

Таблица 3 – Оценки среднеквадратичных отклонений концентраций для некоторых актинидов в UO₂- и MOX-топливе, полученные в различных работах

Нуклид	Среднеквадратичные отклонения ядерных концентраций, %						
	Настоящая работа (48 МВт·сут/кг)		TRITON/ORIGEN 48 МВт·сут/кг		TMC UO ₂ , 50 МВт·сут/кг	GPT UO ₂ , 100 МВт·сут/кг	SCALE UO ₂ , 60 МВт·сут/кг
	UO ₂	MOX	UO ₂	MOX			
²³⁴ U	1,52	1,24	0,2	1,6	1,5	-	3,1
²³⁵ U	0,53	0,29	0,62	1,37	3,2	1,3	0,6
²³⁶ U	0,89	0,48	1,05	1,04	2,7	-	0,4
²³⁷ U	0,83	0,45	2,07	1,93	3,1	-	-
²³⁸ U	0,01	0,01	0,01	0,09	0,07	0,1	0,1
²³⁷ Np	0,98	0,44	1,61	0,79	5,2	5,7	0,8
²³⁹ Np	2,19	2,82	3,88	24,98	1,5	-	-
²³⁸ Pu	1,36	1,02	1,75	1,31	6,7	5,6	0,9
²³⁹ Pu	0,75	1,08	1,07	1,38	2,5	1,8	1,3
²⁴⁰ Pu	2,14	1,62	2,49	2,36	3,2	6,0	1,9
²⁴¹ Pu	2,08	1,75	2,07	1,93	2,4	2,7	1,5
²⁴² Pu	3,22	2,84	3,90	2,59	4,7	3,8	1,4
²⁴¹ Am	2,16	2,25	2,06	1,84	2,1	5,9	1,8
^{242m} Am	2,09	1,89	2,12	1,21	2,3	6,3	-
²⁴³ Am	3,87	3,16	3,89	24,98	6,4	9,2	1,9
²⁴² Cm	2,55	2,01	2,12	1,21	3,3	3,1	-
²⁴⁴ Cm	2,98	2,57	4,34	17,64	9,1	11,9	2,1

В четвертой главе даны оценки погрешностей расчетов реальных конструкций ТВС реакторов ВВЭР-СКД и ВВЭР-1200.

Среднеквадратичные отклонения одногрупповых сечений рассчитывались модулем ERRORR программного комплекса NJOY с использованием файлов 32 и 33 библиотеки оцененных ядерных данных JEFF-3.3 для всех актинидов, начиная с урана, с учетом ковариационных матриц для реального спектра топливных зон и зон воспроизводства. Одногрупповые относительные погрешности сечений реакций для нуклидов $^{236,237}\text{U}$, ^{238}Np , $^{237,242,244}\text{Pu}$, $^{241,242,242\text{m}}\text{Am}$ были получены из библиотеки JENDL-5 ввиду отсутствия файла 33 в библиотеке JEFF-3.3. Ковариационные матрицы погрешностей получены для реакций (n, γ) , (n, f) , $(n, 2n)$, $(n, 3n)$.

В таблице 4 приводятся полученные значения среднеквадратичных отклонений ядерных концентраций актинидов для топливных зон и зон воспроизводства на конец кампании для ТВС реактора ВВЭР-СКД, а в таблице 5 для топливной зоны с UO_2 и $\text{UO}_2+\text{Gd}_2\text{O}_3$ топливом для ТВС реактора ВВЭР-1200.

Таблица 4 – Среднеквадратичные отклонения ядерных концентраций актинилов для топливных зон и зон воспроизводства на конец кампании

Нуклид	Зона							
	НТЗВ	Топл.1	Топл.2	Топл.3	Топл.4	Топл.5	Топл.6	ВТЗВ
²³² U	0,43	1,47	1,50	1,52	1,53	1,51	1,48	0,31
²³³ U	0,84	4,91	4,95	5,00	5,02	4,96	4,90	0,81
²³⁴ U	1,80	1,51	1,23	1,52	1,53	1,26	0,90	1,35
²³⁵ U	0,24	0,27	0,28	0,31	0,31	0,28	0,22	0,13
²³⁶ U	1,65	1,44	1,41	1,50	1,51	1,41	1,30	1,50
²³⁷ U	7,84	6,58	6,54	6,56	6,56	6,54	6,54	6,93
²³⁸ U	0,02	0,04	0,06	0,08	0,08	0,06	0,03	0,01
²³⁵ Np	7,72	7,29	7,26	7,36	7,37	7,28	7,16	7,71
²³⁶ Np	3,23	2,90	2,90	2,94	2,95	2,90	2,86	3,02
²³⁷ Np	1,80	1,53	1,53	1,68	1,69	1,55	1,35	1,46
²³⁸ Np	19,88	19,92	19,92	19,87	19,86	19,92	19,99	19,97
²³⁹ Np	8,90	8,89	8,89	8,89	8,89	8,89	8,90	8,90
²³⁶ Pu	8,16	5,63	5,57	5,74	5,76	5,59	5,51	8,39
²³⁷ Pu	2,05	10,45	10,54	10,36	10,34	10,54	10,64	1,23
²³⁸ Pu	4,18	1,38	1,41	1,73	1,75	1,44	1,01	4,33
²³⁹ Pu	1,75	0,54	0,63	0,73	0,74	0,64	0,46	1,71
²⁴⁰ Pu	2,33	0,64	0,60	0,71	0,72	0,62	0,45	1,87
²⁴¹ Pu	4,56	2,35	2,32	2,64	2,65	2,36	1,82	4,58
²⁴² Pu	10,56	1,50	1,36	1,67	1,69	1,39	0,99	10,62
²⁴³ Pu	37,64	36,63	36,65	36,63	36,63	36,65	36,68	37,91
²⁴⁴ Pu	11,11	7,66	7,65	7,67	7,67	7,65	7,65	11,63
²⁴¹ Am	3,19	2,16	2,10	2,50	2,55	2,15	1,56	2,32
²⁴² Am	11,98	9,19	9,18	9,27	9,29	9,19	9,05	11,85
^{242m} Am	34,79	35,13	35,14	35,06	35,04	35,12	35,25	35,08
²⁴³ Am	12,35	8,03	7,94	8,06	8,08	7,93	7,83	12,30
²⁴⁴ Am	35,20	34,43	34,47	34,40	34,40	34,46	34,55	35,54
²⁴² Cm	12,63	11,01	11,03	11,02	11,02	11,03	11,01	13,03
²⁴³ Cm	7,17	5,65	5,62	5,66	5,66	5,62	5,57	7,28
²⁴⁴ Cm	11,74	8,45	8,48	8,45	8,45	8,48	8,48	12,21
²⁴⁵ Cm	7,19	5,22	5,25	5,26	5,26	5,25	5,22	7,44
²⁴⁶ Cm	6,60	5,23	5,24	5,20	5,20	5,24	5,28	6,86
²⁴⁷ Cm	6,46	5,28	5,29	5,28	5,28	5,29	5,28	6,60
²⁴⁸ Cm	7,37	6,30	6,29	6,24	6,23	6,29	6,34	7,59
²⁴⁹ Cm	15,30	14,83	14,84	14,80	14,80	14,84	14,88	15,45
²⁵⁰ Cm	10,25	8,90	8,81	8,73	8,72	8,80	8,88	10,39
²⁴⁹ Bk	7,83	6,64	6,60	6,58	6,58	6,60	6,61	7,81
²⁵⁰ Bk	34,40	34,59	34,64	34,55	34,53	34,63	34,73	34,72
²⁴⁹ Cf	3,67	2,78	2,78	2,77	2,77	2,78	2,77	3,65
²⁵⁰ Cf	18,79	14,59	14,31	14,23	14,22	14,30	14,42	17,79
²⁵¹ Cf	21,33	18,64	18,62	18,51	18,50	18,61	18,64	21,42
²⁵² Cf	9,89	8,46	8,51	8,39	8,36	8,50	8,54	10,21
²⁵³ Cf	7,65	6,52	6,56	6,46	6,45	6,55	6,56	7,88
²⁵⁴ Cf	25,03	24,33	24,43	24,22	24,21	24,41	24,52	25,60
²⁵³ Es	5,37	4,40	4,42	4,36	4,33	4,41	4,40	5,45
²⁵⁴ Es	20,40	19,70	19,84	19,75	19,72	19,84	19,76	20,93

Таблица 5 – Среднеквадратичные отклонения ядерных концентраций актинидов для топливных зон на конец кампании

Нуклид	ТВэл/УО ₂	ТВэГ/УО ₂ +Gd ₂ O ₃
²³² U	1,06	1,03
²³³ U	1,22	1,21
²³⁴ U	3,42	3,46
²³⁵ U	0,54	0,48
²³⁶ U	1,55	1,51
²³⁷ U	26,70	25,50
²³⁸ U	0,01	0,01
²³⁵ Np	8,74	8,81
²³⁶ Np	6,13	6,05
²³⁷ Np	4,65	4,52
²³⁸ Np	20,05	20,03
²³⁹ Np	8,90	8,90
²³⁶ Pu	7,01	7,36
²³⁷ Pu	15,38	14,66
²³⁸ Pu	4,46	4,39
²³⁹ Pu	2,70	2,69
²⁴⁰ Pu	4,44	4,38
²⁴¹ Pu	6,69	6,64
²⁴² Pu	8,34	8,51
²⁴³ Pu	37,01	37,05
²⁴⁴ Pu	8,37	8,66
²⁴¹ Am	10,74	10,59
²⁴² Am	25,81	25,60
^{242m} Am	33,07	33,08
²⁴³ Am	10,99	11,11
²⁴⁴ Am	40,43	40,49
²⁴² Cm	9,92	10,05
²⁴³ Cm	5,77	5,85
²⁴⁴ Cm	10,38	10,74
²⁴⁵ Cm	7,21	7,34
²⁴⁶ Cm	4,93	5,15
²⁴⁷ Cm	5,10	5,28
²⁴⁸ Cm	5,64	5,88
²⁴⁹ Cm	14,55	14,65
²⁵⁰ Cm	8,27	8,58
²⁴⁹ Bk	16,04	15,89
²⁵⁰ Bk	28,67	28,78
²⁴⁹ Cf	7,28	7,29
²⁵⁰ Cf	27,21	27,10
²⁵¹ Cf	27,84	27,89
²⁵² Cf	9,49	9,87
²⁵³ Cf	7,46	7,75
²⁵⁴ Cf	22,17	22,60
²⁵³ Es	5,60	5,77
²⁵⁴ Es	19,81	20,13

Как видно из таблицы 4, для топливных зон среднеквадратичные отклонения ядерных концентраций нуклидов практически совпадают, тогда как для зон воспроизводства разница больше. Это можно объяснить тем, что в топливных зонах практически одинаковый спектр нейтронов и одинаковый начальный изотопный состав топлива, поэтому значения погрешностей ядерных концентраций практически совпадают. Аналогично и зоны воспроизводства имеют схожий спектр нейтронов и одинаковый начальный изотопный состав топлива. Однако здесь разница в погрешностях ядерных концентраций выражена в большей степени. Разница между топливной зоной и зоной воспроизводства еще больше. В первую очередь это связано с различием изотопного состава свежего топлива. Для зон воспроизводства среднеквадратичные отклонения ядерных концентраций нуклидов в основном выше, за исключением некоторых нуклидов $^{232,233,235,238}\text{U}$, ^{238}Np , ^{237}Pu , $^{242\text{m}}\text{Am}$ и ^{250}Bk . Для основных изотопов урана и плутония погрешности накапливаются по мере выгорания топлива, тогда как для большинства минорных актинидов уменьшаются.

Из таблицы 5 видно, что для рассматриваемых топливных зон среднеквадратичные отклонения ядерных концентраций актинидов практически одинаковы. Это можно объяснить тем, что в этих зонах спектр нейтронов практически одинаков. Начальный изотопный состав топлива различается лишь степенью обогащения топлива и наличием Gd в твэлах, что не оказывает значительного влияния на погрешности в ядерных концентрациях актинидов.

Также с помощью настоящей методики определены сечения, которые имеют наибольшее влияние на погрешности для наиболее важных актинидов, с помощью расчета показателей чувствительности для всех топливных зон и зон воспроизводства. Реакция радиационного захвата на $^{240-242}\text{Pu}$, ^{241}Am и ^{243}Am играет наиболее важную роль. Затем полученные данные используются для определения погрешностей сечений, обеспечивающих предсказания ядерных концентраций нуклидов с заданной точностью без учета корреляций погрешностей с помощью процесса минимизации в программном коде SNOPT.

В таблице 6 представлены требования к уменьшению погрешностей одногрупповых сечений, которые необходимы для достижения целевых показателей точности ядерных концентраций основных актинидов на уровне 5% для ТВС реакторов ВВЭР-СКД и ВВЭР-1200. Хотя это значение достаточно условно, оно соответствует стандартным требованиям, предъявляемым к конструкции реактора на ранних этапах разработки.

Таблица 6 – Требования к уменьшению погрешностей одногрупповых сечений для соответствия целевой точности ТВС реакторов ВВЭР-СКД и ВВЭР-1200

Нуклид	Реакция	Погрешности одногрупповых сечений, %				
		ВВЭР-СКД			ВВЭР-1200	
		Имеющиеся	Требуемые		Имеющиеся	Требуемые
Топл.3	НТЗВ					
^{234}U	(n, γ)	31,0	-	-	32,0	23,5
^{238}U	$(n, 2n)$	16,0	-	-	28,0	8,9
^{238}Pu	(n, f)	35,5	-	16,9	35,5	15,3
^{240}Pu	(n, γ)	18,1	8,7	6,1	10,9	4,2
^{241}Pu	(n, f)	20,2	14,5	3,2	8,3	2,5
	(n, γ)	37,9	15,2	3,7	18,8	7,9
^{242}Pu	(n, γ)	36,8	4,5	2,8	25,2	3,1
^{241}Am	(n, γ)	35,6	6,5	6,3	30,5	5,6
^{243}Am	(n, γ)	33,9	11,5	8,7	20,1	8,8
^{242}Cm	(n, γ)	40,5	19,2	14,3	40,5	18,8
^{243}Cm	(n, γ)	42,6	26,3	20,2	32,5	25,7
^{244}Cm	(n, γ)	45,5	17,5	11,2	42,7	14,4
^{245}Cm	(n, f)	33,2	23,2	13,5	26,5	17,2
	(n, γ)	39,7	21,4	16,2	36,4	20,3

В таблице приведены принятые во внимание в процедуре корректировки нейтронные константы, неопределенности которых вносят наибольший вклад в погрешности концентраций основных актинидов. Во многих случаях были получены очень строгие требования для достижения целевой точности (например, погрешности сечений для ^{241}Pu и ^{242}Pu необходимо уменьшить приблизительно в 10 раз).

Заложенная в программу VisualBurnOut методика дает возможность получить величины отдельных вкладов в погрешность расчета за счет отдельных типов сечений и нуклидов. Рассмотрение величин вкладов и определение наиболее

значимых дает возможность поставить задачу о повышении точности расчетов путем планирования проведения дополнительных экспериментов, направленных на уточнение тех или иных ядерно-физических констант.

Таким образом, созданное программно-методическое обеспечение может служить проверенной базой для оценки точности расчетного предсказания изотопного состава топлива объектов ЯЭУ новых поколений на основе анализа накопленного опыта расчетных исследований.

Хотя в настоящее время полнота и точность оцененных нейтронных данных неизмеримо возросли, тем не менее погрешности расчетных предсказаний, обусловленные неточностью знания нейтронных данных, остаются неприемлемо большими.

Поэтому постановка задачи развития, совершенствования и создания нового поколения системы кодов и константного обеспечения для расчетного обоснования ЯЭУ является и еще многие годы будет являться весьма актуальной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках программного комплекса VisualBurnOut была разработана методика, предназначенная для расчета выгорания топлива и оценки константной погрешности ядерных концентраций нуклидов. Погрешности рассчитываются с помощью метода вариации исходных данных. Корректность предложенного метода была проверена на основе модельных задач и статистического подхода.

Программный комплекс верифицирован применительно к модели ячейки реактора PWR, используемой в качестве международного бенчмарка. Погрешности в ядерных концентрациях, полученные для некоторых нуклидов, были сравнены с результатами других исследований. Выявлено, что среднеквадратичные отклонения в ядерных концентрациях нуклидов, вызванные погрешностями в однокрупных нейтронных сечениях и потоке нейтронов, сложным образом зависят от времени выгорания. По мере выгорания топлива поведение среднеквадратичных отклонений не всегда монотонно и зависит для рассматриваемого нуклида от источника неопределенности, типа скорости

реакции, ядер-предшественников. Материальный состав топлива играет ключевую роль в разнице между среднеквадратичными отклонениями в ядерных концентрациях нуклидов.

Данная методика позволяет выявить типы ядерных реакций, неопределенности сечений которых оказывают наибольшее влияние на погрешность в оценке ядерных концентраций нуклидов.

Получены оценки погрешностей ядерных концентраций наиболее значимых актинидов в конце кампании для моделей ТВС реакторов ВВЭР-СКД и ВВЭР-1200. Эти погрешности обусловлены неопределенностями в используемых однокрупных сечениях. Чтобы достичь целевых показателей точности при расчете ядерных концентраций основных актинидов, необходимо значительно уменьшить неопределенности в однокрупных сечениях.

Результаты оценки погрешностей помогают нам разработать рекомендации по наиболее эффективной стратегии снижения неопределенности в ядерных данных. Исследования неопределенности в этой области могут быть полезны для обмена информацией со специалистами, занимающимися оценкой ядерных данных. Это позволит им выявить области, где все еще имеются значительные недостатки, и определить, какие эксперименты необходимо провести или на каких теоретических исследованиях следует сосредоточить внимание.

Данное исследование вносит свой вклад в развитие методологии оценки различных неопределенностей, возникающих в процессе нейтронно-физических расчетов.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Писарев А.Н., Колесов В.В. Исследование переноса неопределенностей в ядерных данных на ядерные концентрации нуклидов в расчетах выгорания. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2020. – № 2. – С. 108-121.
2. Писарев А.Н., Колесов В.В., Колесов Д.В. Влияние погрешностей в плотности потока нейтронов на погрешности ядерных концентраций

нуклидов, возникающие в процессе расчета выгорания топлива в ячейках с различным спектром нейтронов. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2022. – № 2. – С. 128-137.

3. Колесов В.В., Писарев А.Н. Проверка возможности использования вариационного метода для оценки погрешностей ядерных концентраций в задаче выгорания. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 1. – С. 153-161.
4. Писарев А.Н., Колесов В.В., Котов Я.А., Невиница В.А., Фомиченко П.А. Об оценке неопределенностей ядерных концентраций минорных актинидов при расчетах выгорания топлива в ТВС реактора ВВЭР-СКД. // ВАНТ Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2022. – №4. – С. 35-45.