

На правах рукописи



Лямцев Иван Александрович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ НА
ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАНИЯ ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКОГО И
СТОХАСТИЧЕСКОГО МЕТОДОВ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ К РАСЧЕТУ
ЗАЩИТЫ ЯЭУ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Обнинск, 2021

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

Научный руководитель: **Игорь Рюрикович Суслов,**
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ГНЦ РФ-ФЭИ

Официальные оппоненты: **Евгений Федорович Селезнев,**
доктор технических наук,
главный эксперт АО ВНИИАЭС

Михаил Исаевич Гуревич,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник НИЦ
«Курчатовский институт»

Владимир Петрович Васюхно,
кандидат технических наук
главный научный сотрудник АО «НИКИЭТ»

Защита состоится «9» марта 2022 г. в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.01.03 на базе «Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» по адресу г. Москва, Каширское ш., 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке «НИЯУ «МИФИ» и на сайте www.ds.mephi.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2021г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета МИФИ.01.03,

канд. физ.-мат. наук

Е.С. Куликов

Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена разработке и развитию проектно-ориентированной версии гибридного метода PO-CADIS, в основе которого заложена существующая методология CADIS (Consistent Adjoint Driven Importance Sampling), для проведения расчетов глубокоэшелонированной радиационной защиты с ослаблением по ионизирующему излучению до 17 порядков.

Актуальность работы

При проектировании радиационной защиты реактора приходится иметь дело с довольно сложной картиной прохождения нейтронов и γ -квантов сквозь защитные компоненты. Защита должна обеспечивать необходимое ослабление потоков первичного нейтронного и γ -излучений, вторичного γ -излучения, возникающего при поглощении нейтронов, определенный уровень тепловыделения и т.п. При этом необходимо, чтобы вес и габариты защиты были минимальными, либо чтобы при заданном весе и габаритах защиты была минимальна доза ионизирующего излучения. Для удовлетворения таких требований необходимо знать детальные энергетические и пространственные распределения плотностей потоков частиц в различных средах.

С ростом производительности вычислительной техники широкое применение в области расчета радиационной защиты ЯЭУ получил метод Монте-Карло. Данный метод стал использоваться не только как способ решения отдельных локальных задач, но и как высокоточный инструмент для инженерных расчетов в разработке проектов реакторных установок, в частности при проектировании биологической радиационной защиты с различным материальным составом и большой кратностью ослабления ионизирующего излучения. Тем не менее, расчеты, проводимые по методу Монте-Карло напрямую без использования дополнительных программ и методик, не позволяют получить оценки рассчитываемых функционалов за защитой с большой кратностью ослабления ионизирующего излучения 10-17 порядков от источника излучения с необходимой точностью расчета.

Детерминистические методы также находят все большее применение, но их полномасштабное использование в проектных расчетах, до сих пор ограничено

производительностью ЭВМ, включая как мощность ЦПУ, так и объем оперативной памяти.

В результате сложившейся ситуации образовалась область реакторных задач, в которой ни детерминистический, ни стохастический подходы по отдельности не могут обеспечить достаточно точное решение. Это задачи прохождения частиц сквозь толстые слои защиты. С одной стороны, при степенях ослабления потока частиц 10-15 порядков набор достаточной статистики прямым моделированием практически невозможен, с другой, точность детерминистических методов оказывается сильно ограниченной необходимостью использования ряда приближений: групповой подход с количеством групп не более нескольких десятков; ограничения углового разбиения, приводящие к искажениям индикатрис рассеяния, «лучевым эффектам» и др.

Использование гибридных (комбинированных) методов расчета, основанных на совместном применении детерминистических и стохастических программ, является перспективным подходом, сочетающим высокую точность и приемлемые вычислительные затраты. Подчеркнем, что метод является гибридизацией двух «независимых» подходов, включающий разработку дополнительных расчетных блоков для детерминистического кода, кода Монте-Карло, и отдельного расчетного кода для итерационного согласования пространственно-энергетических весовых окон.

Предложенный более 20 лет назад, метод продолжает активно развиваться в части расширения области применения и уточнения расчетной технологии.

В настоящее время интенсивно разрабатываются и применяются различные гибридные методы расчета переноса частиц. Существует множество расчетных кодов с реализацией автоматического уменьшения дисперсии. Среди них можно выделить следующие расчетные коды: AVATAR, ATTILA, ADVANTAG и др. Однако в большинстве случаев их использование и применение в прикладных задачах затруднительно, поскольку данные расчетные коды являются продуктом ограниченного распространения и некоторые из них, например ATTILA, на данный момент в Россию не поставляют.

В данной работе показано, что развитие расчетного гибридного метода на основе уже имеющихся в России расчетных кодов позволит выполнять расчеты радиационной защиты практически любой сложности с ослаблением ионизирующего излучения 10-17 порядков.

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является развитие гибридного метода PO-CADIS, включая его верификацию, апробацию на примерах расчета радиационной защиты от ионизирующего излучения, прежде всего для задач с большими кратностями ослабления (в работе представлены результаты для ослабления 10-17 порядков), применение для выбора и обоснования защиты ЯЭУ.

Для достижения поставленной задачи были решены следующие задачи:

- Выполнен анализ существующих программ и методик расчетов.
- Предложен и реализован гибридный метод расчета PO-CADIS на основе существующей методологии CADIS (Consistent Adjoint Driven Importance Sampling).
- Разработаны этапы проведения расчетов по гибриднему методу PO-CADIS.
- Выполнена верификация гибридного метода PO-CADIS на примере тестовых задач, показательных с точки зрения физики радиационной защиты, в частности на международном бенчмарке Кобаяши.
- Выполнена апробация гибридного метода PO-CADIS на примере расчета глубокоэшелонированной радиационной защиты с большими кратностями ослабления применительно к выбору и обоснованию радиационной защиты транспортной ЯЭУ и энергетического реактора с ТЖМТ.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается:

- в развитии гибридного метода PO-CADIS, с помощью которого можно проводить нейтронно-физические расчеты с большими толщинами и геометрически сложной многослойной биологической защитой для ЯЭУ с ослаблением ионизирующего излучения до 10-17 порядков и получать результаты со статистической погрешностью счета 5-10 %;
- впервые гибридный метод PO-CADIS реализован в комбинации с детерминистической программой характеристик MCCG3D и стохастической программой MCNP;
- впервые с помощью гибридного метода выполнен нейтронно-физический расчет радиационной защиты ЯЭУ и показана эффективность разработанной методики;

- впервые в гибридном методе PO-CADIS использована расчетная схема с применением техники смещения источника по пространству и энергии, повысившая эффективность расчетов.

Личный вклад автора заключается

- в развитии гибридного метода PO-CADIS, а именно в разработке алгоритма построения весовых окон для многогрупповой задачи и составлении расчетного модуля постобработки результатов кода Meshtal2MX;
- в разработке и представлении этапов расчета радиационной защиты по гибриднему методу PO-CADIS – методики расчета, как универсального расчетного инструмента для расчета сложной трехмерной, глубокоэшелонированной радиационной защиты ядерных энергетических установок с ослаблением уровней ионизирующего ослабления 10-17 порядков;
- в выполнении верификационных расчетов на примере бенчмарка Кобаяши и тестовых задач подтверждающих достоверность и эффективность полученных результатов по гибриднему методу PO-CADIS;
- в выполнении нейтронно-физических расчетов защитных задач по гибриднему методу PO-CADIS с целью снижения массогабаритных характеристик радиационной защиты ЯЭУ, выработке предложений и рекомендаций по ее компоновке и совершенствованию;
- в выполнении расчетов гибридным методом с применением техники смещения источника по пространству и энергии на примере тестовой модели защиты быстрого энергетического реактора;
- в представлении и обсуждении результатов на конференциях, подготовка публикаций и докладов.

Достоверность и обоснованность результатов работы

Представленный гибридный метод PO-CADIS реализован с использованием прецизионных расчетных кодов MCNP и MCCG3D. Результаты расчетов по гибриднему методу PO-CADIS верифицированы на международном бенчмарке Кобаяши и тестовых задачах, и подтверждаются сравнением с результатами, полученными по другим методам и программам, как автором, так и другими научными коллективами.

Практическая значимость

- Практическая значимость предлагаемого метода PO-CADIS заключается, во-первых, в том, что расчетчику не надо задавать весовые окна вручную, полагаясь на свой опыт и интуицию. Весовые окна генерируются автоматически из решения сопряженной задачи по детерминистическому расчетному коду. Во-вторых, данный метод позволяет решать сложные задачи радиационной защиты ядерных энергетических установок на практически офисных компьютерах.
- Гибридным методом расчета PO-CADIS были выполнены расчеты по выбору профиля и компоновке РЗ ЯЭУ. В результате массу РЗ транспортной ЯЭУ удалось снизить на 20 %, по сравнению с первоначальным эскизным проектом. С помощью гибридного метода PO-CADIS была повышена точность и эффективность расчетов РЗ ЯЭУ транспортного назначения, снижено время на моделирование защитных композиций, что позволило улучшить технические и экономические характеристики проектируемой ЯЭУ.
- По гибриднему методу PO-CADIS было посчитано распределение ионизирующего излучения в РЗ ЯЭУ с ТЖМТ с ослаблением 17 порядков от верха активной зоны до верхних датчиков со статистической точностью менее 10 %. На примере данной задачи был показан один из случаев, когда расчет по прямому методу с ручным понижением дисперсии является малоэффективным в сравнении с расчетом по гибриднему методу.
- С помощью гибридного метода PO-CADIS были выполнены работы по расчетному обоснованию размещения защитных материалов в защитных конструкциях и воздействию на персонал ионизирующего излучения при создании испытательных стендов для ЯЭУ ВН.

Основные положения, выносимые на защиту

- развитие гибридного метода PO-CADIS на основе расчетной схемы (MCCG3D+MXWWG+MCNP);
- развитие методики проведения расчетов радиационной защиты ЯЭУ по гибриднему методу PO-CADIS, включая алгоритм выбора узлов пространственной сетки весовых окон для многогрупповой задачи;

- алгоритм проведения расчетов по гибричному методу PO-CADIS;
- результаты верификации расчетного инструмента PO-CADIS на примере тестовых задач, показательных с точки зрения физики радиационной защиты, в частности на международном бенчмарке;
- результаты нейтронно-физических расчетов радиационной защиты ЯЭУ гибридным методом PO-CADIS и на их основе выработка предложений и рекомендаций по ее компоновке и совершенствованию.

Апробация

Основные положения и результаты работы были представлены на:

- межотраслевом семинаре «Нейтроника» в 2012 г. (г. Обнинск, Россия);
- межотраслевом семинаре «Нейтроника» в 2015 г. (г. Обнинск, Россия);
- конкурсе работ молодых ученых на соискание премии имени А.И. Лейпунского в 2012, 2017 г., где работы были отмечены призовыми местами второй и первой степени, соответственно (г. Обнинск, Россия);
- 10-я юбилейная Российская научная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях» в 2015 г. (г. Москва-Обнинск, Россия).
- Конференция молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике» в 2017 г. «НИКИЭТ» (г. Москва, Россия).

Публикации

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в **девяти** публикациях в открытой печати, в том числе:

- **трех** статьях в рецензируемых научных журналах «Атомная энергия» и «Ядерная энергетика. Известия вузов»;
- **трех** препринтах ГНЦ РФ-ФЭИ;
- **трех** докладах, опубликованных в сборниках тезисов и докладов Российских конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 96 наименований, содержит 130 страниц, 16 таблиц и 42 рисунка.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность рассматриваемой темы, необходимость внедрения новых расчетных гибридных схем, на основе совмещения детерминистических и стохастических методов решения. Приведены положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна работы и практическая значимость выбранной темы диссертации.

Первая глава посвящена анализу существующих программ и методик уменьшения статистической погрешности счета, применяемых в задачах на глубокое прохождение ионизирующего излучения сквозь оптически толстые и многослойные слои радиационной защиты. По каждому отдельному методу кратко изложены преимущества и недостатки. Показаны основные причины выбора стохастического программного кода MCNP и детерминистического кода MCCG3D как инструментов для анализа процессов, происходящих в ЯЭУ. Показана необходимость внедрения новых расчетных гибридных схем, на основе совмещения детерминистических и стохастических методов решения.

Существующие на сегодняшний день программные коды реализованы на основе двух расчетных методов: детерминистический (метод характеристик, метод дискретных ординат, метод конечных элементов и т.д.) и стохастический метод (метод Монте-Карло).

Численные методы решения уравнения переноса, основанные на детерминистическом подходе к настоящему времени имеют широкое распространение в области расчета радиационной защиты ЯЭУ. Выбор метода и его эффективность очень сильно зависят от особенностей решаемой задачи: точности описания геометрии, точности требуемого решения, применяемых упрощений при описании физических процессов. Основными направлениями, используемыми при численном решении уравнения переноса, являются: метод дискретных ординат, метод моментов, метод конечных элементов, метод сферических гармоник, метод вероятностей первых столкновений, метод характеристик.

Недостатком расчетных кодов, основанных на детерминистическом подходе, является ограниченность в описании детальной геометрии. Примеры программ, в которых

реализован детерминистический метод расчета: РОЗ/КАСКАД/КАТРИН, РАДУГА, ONEDATE/TWODANT, ODETTA, MССG3D.

В последний период времени значительно выросли мощности вычислительной техники. По этой причине возникло активное развитие расчетных программ на основе метода Монте-Карло к задачам решения уравнения переноса излучения.

Основное преимущество данных программ заключается в возможности подробного и детального описания сложной трехмерной геометрии поставленной задачи. В последнее время наиболее стремительное развитие получили расчетные программы, основанные на методе Монте-Карло: MCNP, ММКС, МСU, ММККЕНО.

Ввиду особенности задач «глубокого прохождения», даже при большом числе моделируемых частиц, лишь очень малое их количество достигает внешних областей защиты, где и необходима оценка физических параметров. Как показывает практика при описании прохождения излучения в композициях защиты ядерных установок с большими кратностями ослабления прямой расчет в «лоб» методом Монте-Карло является малоэффективным.

Зачастую даже применение суперкомпьютеров при решении прямой задачи не позволяют получить оценку с приемлемой точностью (5-10 %). Повышение точности становится возможным либо за счет неаналогового моделирования – методами понижения дисперсии – (русская рулетка, стандартные весовые окна), либо за счет внедрения в расчетную практику новых, более эффективных расчетных схем. Для решения второй задачи рассмотрим следующие этапы:

1. выбор этих схем из имеющегося научного задела;
2. реализации в виде программ или расчетных цепочек из имеющихся программ;
3. проверка точности и эффективности на относительно простых задачах, обеспечивающих ясную физическую и математическую интерпретацию хода расчета и получаемых результатов;
4. подбор параметров выбранной расчетной схемы к вычислительным особенностям проектируемой ЯЭУ;
5. обоснование точности получаемых результатов.

Одним из наиболее перспективных подходов является использование для задания ценности частиц приближенного решения вспомогательной задачи, полученного с

помощью более быстрого детерминистического метода. Как хорошо известно, еще с 50-х годов прошлого столетия, ценность нейтронов определяется из «сопряженного решения» – решения сопряженного уравнения переноса для рассчитываемого функционала.

Таким образом, расчет полей ионизирующих излучений по методу статистических испытаний (метод Монте-Карло) в связке с детерминистическим методом позволяет в принципе выполнять расчеты для защиты любой сложности. В результате необходимости проведения нейтронно-физических расчетов полей ионизирующих излучений не только в составных частях защиты ядерной энергетической установки, а всего протяженного массива защиты с большой кратностью ослабления 10-17 порядков, возникла потребность в разработке расчетного инструмента, в основе которого заложена гибридная методика.

Вторая глава посвящена описанию метода длинных характеристик и его реализации в детерминистической программе MCCG3D. Показана возможность использования программы MCCG3D для выработки весовых окон, с целью понижения дисперсии в расчетах по методу Монте-Карло в программе MCNP.

Существует два основных преимущества метода характеристик: отсутствие численной дисперсии и гибкость в описании геометрии, сравнимая с методом Монте-Карло. С другой стороны, метод страдает от значительных вычислительных затрат времени и требует больших ресурсов памяти. Чтобы обеспечить его эффективность, требуется применение многочисленных алгоритмических «трюков» по организации вычислений и уменьшению хранимой в памяти информации. Преимущества метода и требуемая память зависят от решаемой задачи, т.е. улучшения, обеспечивающие эффективность метода характеристик, являются проблемно-ориентированными, поэтому необходимо исследовать эффективность метода и программы MCCG3D отдельно для каждого класса приложений.

Программа MCCG3D может быть использована в широком круге задач расчета пространственно-углового и энергетического распределения нейтронов – как для расчета ячейки и активной зоны, так и для задач ядерной безопасности и защиты.

Программа MCCG3D принципиально (без учета ограничений памяти ЭВМ и времени решения) позволяет при заданных сечениях и геометрии получить решение с любой наперед заданной точностью, т.е. имеет нулевую принципиальную верификационную погрешность, т.е. относится к классу прецизионных программ. Таким образом, валидационная погрешность, погрешность решения практических задач

программы определяется погрешностями используемых констант (программа MCCG3D позволяет использовать любую систему подготовки констант – например CONSYST, БНАБ, подготовленные файлы в формате ANISN и др.), технологическими погрешностями и верификационной погрешностью, связанную с ограничением памяти ЭВМ. Развитие ЭВМ быстро уменьшает последнюю компоненту.

Для верификации программы MCCG3D были выполнены расчеты дозиметрических экспериментов, проведенных в 1982 году на реакторе нулевой мощности (критсборке) VENUS-2. Активная зона реактора содержит 12 квадратных (15×15 твэлов) тепловыделяющих сборок (ТВС). В центральную область активной зоны загружены ТВС с урановым топливом, на периферии – с MOX-топливом. Экспериментальные данные VENUS-2 включают результаты измерений аксиальной утечки и потвэльного распределения поля деления и некоторых важных скоростей реакций, а также полное детальное верифицированное описание геометрии и состава сборки.

Использовалась библиотека констант BUGLE-96 с 47-ю нейтронными группами. Была использована 45-градусная геометрическая модель с детальным гетерогенным описанием активной сборки в плоскости с точным описанием геометрии твэлов. Результаты расчетов по программе MCCG3D в основном находятся в 10% интервале от экспериментальных значений и вполне согласуются с результатами других участников дозиметрического теста. Для сравнения приведены результаты программ метода Монте-Карло MCU и метода дискретных ординат LUCKY из заключительного отчета по дозиметрическому бенчмарку VENUS. Геометрическая модель сборки VENUS-2 показана на рисунках 1 и 2, а результаты расчетов приведены на рисунке 3.

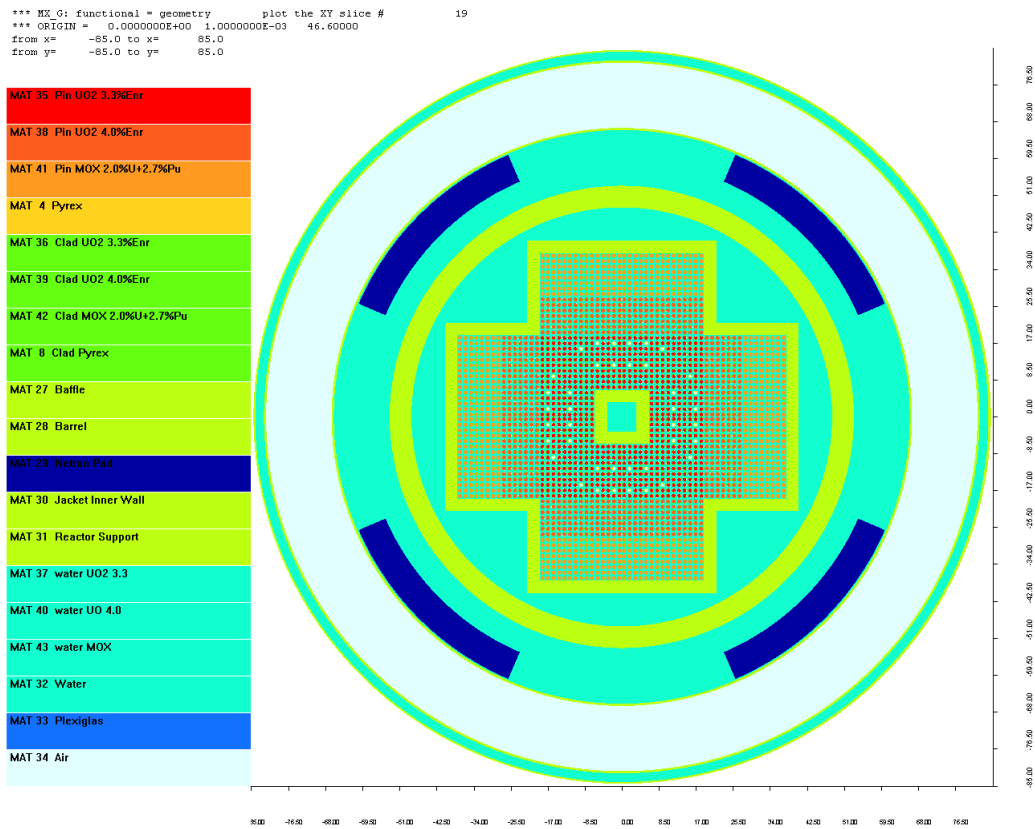


Рис. 1 – Геометрическая модель сборки VENUS-2 для программы MCG3D (горизонтальное сечение).

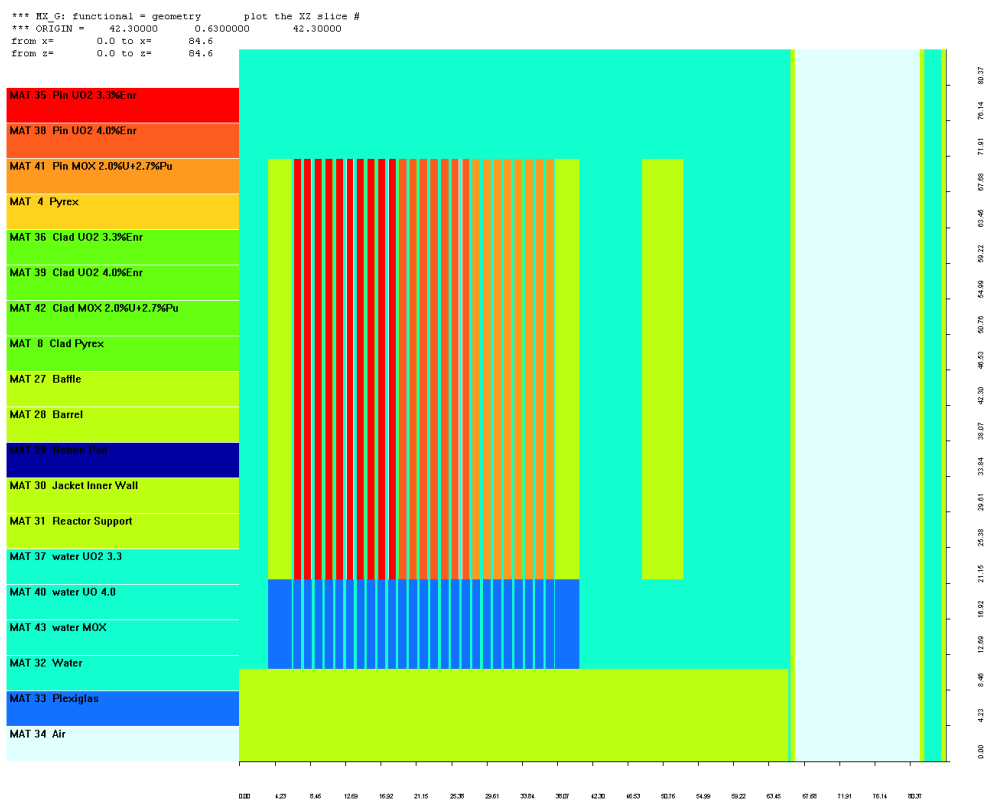


Рис. 2 – Геометрическая модель сборки VENUS-2 для программы MCG3D (вертикальное сечение).

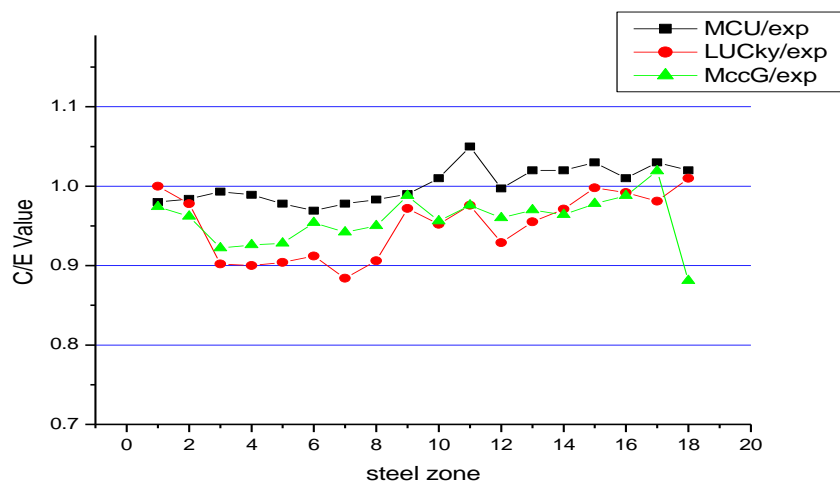


Рис. 3 – Отношение расчетных и экспериментальных эквивалентных потоков деления для детектора $^{58}\text{Ni}(n,p)$ в стальных зонах.

Результаты расчетов по программе MCG3D в основном находятся в 10% интервале от экспериментальных значений и согласуются с результатами других участников дозиметрического теста.

Одним из перспективных подходов в решении сложных глубокоэшелонированных защитных задач является использование программы MCG3D в сочетании с программой MCNP. Бенчмарк OECD для трехмерного уравнения переноса в областях с пустотами, предложенный профессором Kobayashi, предоставил отличную возможность оценить эффективность расчета по гибриднему методу PO-CADIS для этого трудного класса задач глубокого прохождения. С использованием гибридного метода PO-CADIS проведены расчеты тестовых задач в упрощенной геометрии, показательных с точки зрения физики радиационной защиты. Геометрия задачи OECD-3 показана на рисунке 4.

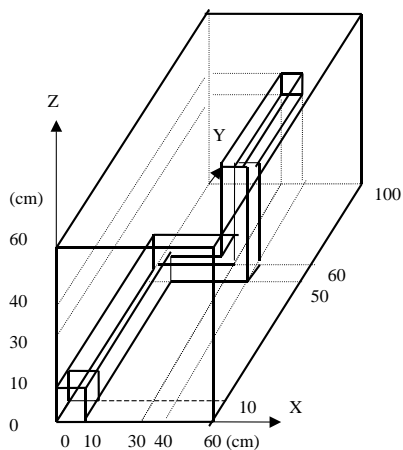


Рис. 4 – Геометрия задачи OECD-3.

При расчете ценности в качестве источника сопряженной задачи в программе MCCG3D был задан единичный источник в наиболее удаленном «детекторе», в ячейке размером 10x10x10, содержащей точку с координатами (55, 95, 35). Поскольку рассматривалась одnogрупповая задача, то не было необходимости менять порядок рассмотрения энергетических групп, что необходимо сделать в многогрупповом расчете. Приведены результаты трех расчетов по программе MCNP. Первый расчет с 200 миллионами историй использовался как reference-решение. Кроме него было проведено два расчета с 200 тысячами историй: расчет с использованием ценностей полученных из программы MCCG3D и для сравнения расчет с тем же количеством историй без использования ценностей.

В таблице 1 представлены результаты для наиболее удаленной от источника и наиболее трудной для вычисления ячейки с центром (55, 95, 35), для значения плотности потока в которой и вычислялось сопряженное решение. В колонках таблицы представлены:

1. MCCG3D Point Reference – решение для значения **в точке**, полученное на мелкой пространственной и угловой сетке по программе MCCG3D с использованием источника первых столкновений и метода последних столкновений. В данной работе это решение носит чисто иллюстративный характер, так как для простоты в данной работе рассматривались потоки в ячейках размером 10x10x10, а не значения в точках.
2. MCNP Reference– решение с 200 миллионами историй по программе MCNP.
3. MCNP1 – решение по программе MCNP со 100 тысячами историй.
4. MCNP2 – решение по программе MCNP с миллионом историй.
5. MCNP+MCCG3D – решение по программе MCNP со 100 тысячами историй с использованием ценностей полученных по программе MCCG3D на грубой пространственной и угловой сетках

Таблица 1 – Плотность потока нейтронов в ячейке с центром в (55,95,35).

	<i>MCCG3D Point Reference</i>	<i>MCNP Reference</i>	<i>MCNP1</i>	<i>MCNP2</i>	<i>MCCG3D+ MCNP</i>
	1	2	3	4	5
$\phi(55,95,35)$	$4.43 \cdot 10^{-5}$	$4.67 \cdot 10^{-5}$	$5.57 \cdot 10^{-5}$	$7.23 \cdot 10^{-5}$	$4.67 \cdot 10^{-5}$

Историй		$2 \cdot 10^8$	10^5	10^6	10^5
FOM		29	10	60	1198
FSD(%)		2.23	76.76	25.40	2.80
Время(мин)		69.53	0.03	0.26	0.32

Результаты, представленные в таблице 1, показывают высокую эффективность и надежность связки программ MCCG3D+MCNP для расчета одного функционала. Время расчета одной истории при расчете с ценностями частиц, полученными из программы MCCG3D, примерно на порядок больше, чем в стандартном расчете (колонки MCNP1 и MCCG3D+MCNP). Также из таблицы видно, что увеличение количества историй в 10 раз (при примерно одинаковом времени расчета, колонки MCNP2 и MCCG3D+MCNP) не обеспечивает получение статистической погрешности счета, как в связке программ MCCG3D+MCNP. Сравнение по критерию FOM колонок MCCG3D+MCNP и MCNP Reference показывает выигрыш первой по эффективности примерно в 40 раз.

С учетом вышеизложенных результатов расчетов можно сказать, что представленная расчетная схема является подходящим и перспективным гибридным инструментом расчета сложных трехмерных защитных композиций ЯЭУ.

Третья глава посвящена описанию методики расчета и расчету биологической защиты ЯЭУ при помощи гибридного метода PO-CADIS. Представлены этапы проведения расчета биологической защиты ЯЭУ на основе использования детерминистического расчетного кода MCCG3D и стохастического кода MCNP. Показана возможность расчета дозовых функционалов за биологической защитой с ослаблением 10-15 порядков со статистической погрешностью 5-10 %.

В данной главе представлен вариант гибридного метода расчета защиты на основе совместного использования метода Монте-Карло с непрерывной зависимостью сечений от энергии и метода характеристик. Метод реализует схему автоматического уменьшения дисперсии CADIS на основе решения многогрупповой сопряженной задачи методом характеристик по программе MCCG3D и моделировании пространственно-энергетических весовых окон на вспомогательной сетке для расчета по методу Монте-Карло в программе MCNP. Представлена общая структура метода, включающая результаты модельных расчетов, подтверждающие высокую эффективность гибридного метода PO-CADIS.

Говорится о методике проведения расчетов биологической защиты ЯЭУ с помощью развиваемого гибридного метода реализованного в виде расчетной цепочки (MCCG3D+MX_WWG+MCNP).

Основная мотивация применения гибридного метода PO-CADIS для расчета радиационной защиты ЯЭУ состоит в следующем:

- возможность прямого учета всех элементов конструкции ЯЭУ, которые вносят заметный вклад в ослабление излучения;
- непосредственный расчет функционалов без дополнительной экстраполяции;
- корректное описание сечений взаимодействий, прежде всего анизотропии рассеяния γ -квантов и нейтронов высокой энергии.

Наиболее приближенная к реальной геометрии модель рассчитываемой ЯЭУ, позволяет уменьшить запасы на неопределенность и получить минимальные массогабаритные характеристики.

Расчет по гибриднему методу PO-CADIS отображен в последовательных пунктах:

- расчет сопряженной задачи по программе MCCG3D – построение геометрической модели и расчетной сетки в программе MCCG3D, решение сопряженного уравнения поля ценности для выбранного функционала;
- подготовка файла весовых окон с помощью программы MX_WWG – построение сетки WWG (Weight Windows Grid) для весовых окон – проектирование сетки программы MCCG3D на сетку WWG – проверка выполнения условия $w_i/w_{i+1} < 3$, т.е. вес частицы должен отличаться не более, чем в 3 раза по сравнению с весом частицы в соседней ячейке. Если условие $w_i/w_{i+1} < 3$ не выполняется, то построение сетки WWG производится заново, т.е. она разбивается на более мелкие ячейки до тех пор, пока условие не будет выполнено – гладкость решения, т.е. отсутствие осцилляций в решении сопряженной задачи по программе MCCG3D;
- расчет по программе MCNP;
- подготовка файла дозовых функционалов с помощью программы Meshtal2MX;
- визуализация дозовых функционалов с помощью программы MCCG_G (визуализатор для программы MCCG3D).

Преимущества применения гибридного метода PO-CADIS – это учет многих неопределенностей деталей конструкции ЯЭУ, таких как активная зона, насосы,

теплообменники, тракты движения теплоносителя, биологическая защита, внутрикорпусная защита и т.д. Возможность проведения оптимизации биологической защиты с помощью профилирования, как по высоте, так и по периметру. В частности, для достижения минимальной массы системы радиационной защиты необходимо: описать все чувствительные к радиации объекты, их габариты и места расположения, детализировать все крупногабаритные конструкции по размерам, массам и т.п. Конфигурация защиты (толщины и профили слоев) затем выбирается исходя из вклада излучения от источника.

Приведем этапы расчета биологической защиты транспортной ЯЭУ гибридным методом PO-CADIS.

Этап 1. Расчет предварительной компоновки защиты

На начальном этапе проводится предварительная компоновка радиационной защиты ЯЭУ, оцениваются такие параметры, как материалы защиты, их взаимное расположение и совместимость в целях предотвращения преждевременной коррозии, радиационная стойкость, доступность этих материалов с экономической точки зрения, эффективность применяемой радиационной защиты ЯЭУ.

Этап 2. Проведение радиальной оптимизации (OptCylinder)

На данном этапе рассматривается одномерная модель радиационной защиты ЯЭУ напротив центра активной зоны, поскольку именно здесь наблюдаются максимальные уровни излучения.

Оптимизация в радиальном направлении рассчитывается по программе OptCylinder – одномерной программе, которая рассчитывает толщину каждого слоя радиационной защиты ЯЭУ или варьирует их в зависимости от функционалов-ограничителей – масса радиационной защиты и мощность дозы нейтронного и γ -излучения.

На начальной стадии оптимизации массогабаритных характеристик защиты создается цилиндрическая модель, состоящая из слоев различного рода материалов, которая изображена схематически на рисунке 2. Модель защиты выбирается как наиболее приближенная к реальной геометрии. Вследствие ограничений по мощности дозы за переборкой и общей массы ЯЭУ, требуется детальная проработка каждого слоя защиты. Наиболее приоритетным направлением при дальнейшей работе по оптимизации выбирается направление в сторону стены, за которой предположительно находится персонал.

преобразуется в ценности или весовые окна, которые в свою очередь используются в вычислениях по методу Монте-Карло.

Этап 6. Подготовка файла весовых окон с помощью программы MX_WWG

Подготовка файла весовых окон выполняется с помощью программы MX_WWG. Данный код вычисляет величины обратно пропорциональные ценностям частиц и получает нижние границы весовых окон каждого элемента и каждой энергетической группы. Весовые окна затем нормируются на источник таким образом, что источник генерирует частицы с весом внутри весового окна.

Этап 7. Расчет по программе MCNP

После того, как создан файл весовых окон с именем WWINP, производится прямой расчет дозовых функционалов. Файл с данными о весовых окнах считывается программой MCNP одновременно с главным входным файлом, в котором описана геометрия. По окончании вычислений на экран выводится файл с названием Meshtal, в котором содержатся значения доз для всей расчетной области.

Этап 8. Подготовка файла дозовых функционалов с помощью программы Meshtal2MX

Данный код формирует новые координаты, которые более практичны в применении при дальнейшей графической визуализации изображения дозовых полей для всей расчетной области.

Этап 9. Визуализация дозовых функционалов с помощью программы MCCG_G

С помощью программы MCCG_G графически изображаются трехмерные дозовые поля для всей расчетной области.

Этап 10. Локальная трёхмерная оптимизация БЗ

После проведения всех вычислений, с получением трехмерного изображения дозовых функционалов для всей расчетной области, производится оценка необходимости применения дополнительных мер по оптимизации биологической защиты, с целью достижения, как минимальных массогабаритных характеристик установки, так и выполнения условий по функционалам-ограничителям.

Этап 11. Оценка выполненных расчетов

После проведения всех необходимых расчетов производится оценка выполненных расчетов. В данном случае оценка выполненных расчетов подразумевает под собой обработку полученных расчетных данных на предмет неточностей связанных с описанием расчетной геометрии, величины статистической погрешности нейтронно-физических расчетов, обсуждении возможности дальнейшей оптимизации радиационной защиты и т.д.

В **четвертой главе** представлен расчет радиационной защиты модельной ядерной энергетической установки с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем по гибридной методике. Описан алгоритм выбора узлов сетки весовых окон. Продемонстрирована эффективность гибридной методики расчета с применением техники смещения источника по пространству и энергии на примере тестовой задачи «Радиальная защита быстрого реактора».

Для демонстрации возможностей гибридного метода расчёта защиты PO-CADIS рассмотрена упрощенная модель, которая соответствует проекту быстрого реактора моноблочного типа с оксидным топливом, охлаждаемый эвтектическим свинцово-висмутовым сплавом.

Активная зона реактора высотой 90 см формируется из 61 ТВС. Каждая ТВС состоит из стержневых твэлов, образующих в сборе правильную треугольную решетку. В центре ТВС располагается шестигранная кессонная труба, внутри которой размещены стержни управления защиты реактора. СУЗ содержит 50 поглощающих стержней втулочной конструкции из горячепрессованного карбида бора с различным обогащением по ^{10}B . Положение органов СУЗ по высоте соответствует критическому состоянию активной зоны со свежим топливом. Сверху и снизу к активной зоне примыкают стальные отражатели.

В нижней части активной зоны расположены стальные решётки с отверстиями для прохода теплоносителя: нижняя решетка ТВС, к которой крепятся нижние концевики твэлов, нижняя решетка активной зоны, к которой крепятся ТВС с одной стороны и механический фильтр с другой. Под нижними решетками располагается входная напорная камера реактора, которая сформирована расположенными в нижней части моноблока металлоконструкциями и эллиптическим днищем прочного корпуса. На днище корпуса находится вытеснитель.

Аналогично верхние концевики твэлов размещаются в верхней решетке ТВС, выше которой расположена выходная камера реактора, ограниченная сверху конструкциями

защитной пробки. Защитная пробка представляет собой обечайку цилиндрической формы с засыпкой из карбида бора, выполняющая функцию радиационной защиты. Засыпка разделена на несколько зон по высоте пробки с помощью листов из стали. Через пробку по всей ее высоте проходят кожухи под чехлы рабочих органов СУЗ. В расчёте тщательно моделировали внутреннюю структуру пробки. Под нижней плитой пробки установлен стальной вытеснитель для отвода потока теплоносителя по выходным отверстиям пробки. Непосредственно к внешнему ряду твэлов активной зоны примыкает боковой отражатель, смоделированный гомогенным составом из стали и теплоносителя. Далее по радиусу располагается радиационная защита, также смоделированная гомогенным составом из карбида бора и теплоносителя. Модули парогенератора и циркуляционные насосы в расчёте представлялись гомогенизированным составом. Общая высота расчетной модели реактора составила ~6,9 м, диаметр ~4,4 м, высота защитных конструкций в направлении вверх от активной зоны ~4 м, толщина защитных конструкций в боковом направлении ~ 1,5 м.

Геометрия расчетной модели ЯЭУ с ТЖМТ для программы MCCG3D приведена на рисунке 5. Для данной модели были посчитаны сопряженные многогрупповые нейтронные потоки с последующим преобразованием в весовые окна относительно детектора, расположенного на верхней границе расчетной области.

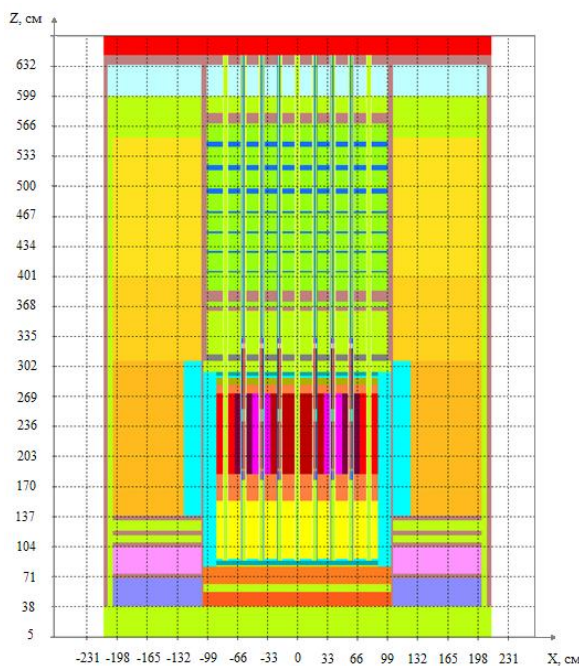


Рисунок 5 – Расчетная модель реактора с ТЖМТ (вертикальное сечение).

Источник сопряженной задачи в программе MССG3D задан на верхней границе расчетной области. На рисунке 6 показана рассчитанная по программе MССG3D сопряженная функция. Отметим, что отсутствие осцилляций и гладкость решения в программе MССG3D, является важным критерием для успешного применения метода.

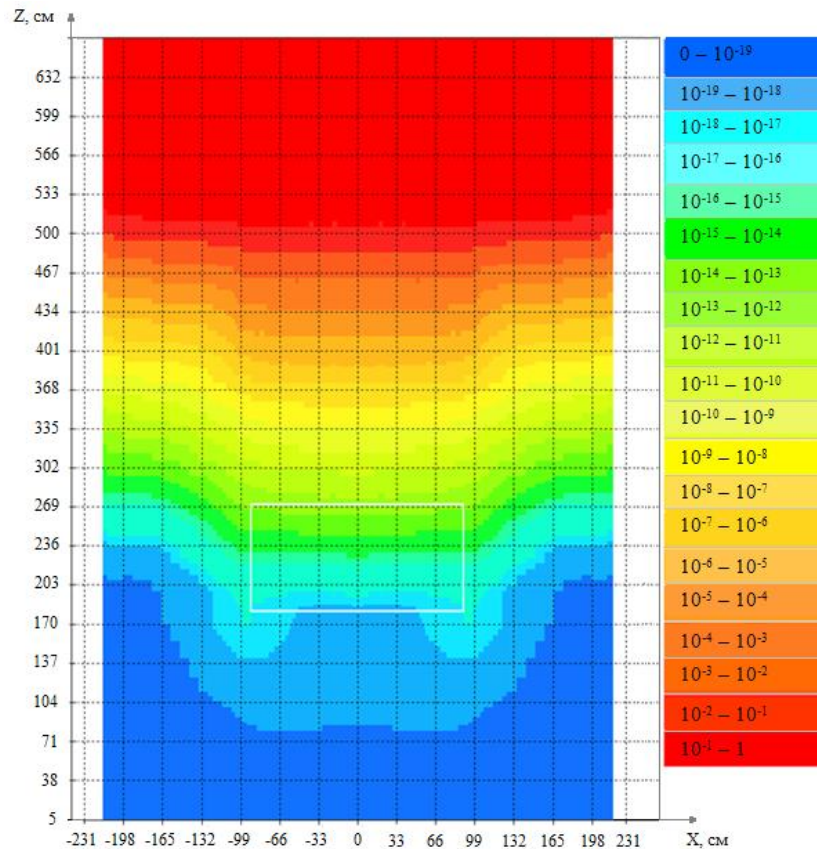


Рисунок 6 – Сопряженная функция для детектора, заданного на верхней границе расчетной области (вертикальное сечение).

С полученными весовыми окнами по программе MCNP рассчитано распределение плотности потока нейтронов в радиационной защите, корпусе моноблока, во всех конструкциях вверх от активной зоны, вплоть до максимального расстояния 4 метра от верха активной зоны. Распределение плотности потока нейтронов от активной зоны до верхних датчиков, нормированное на единицу, показано на рисунке 7.

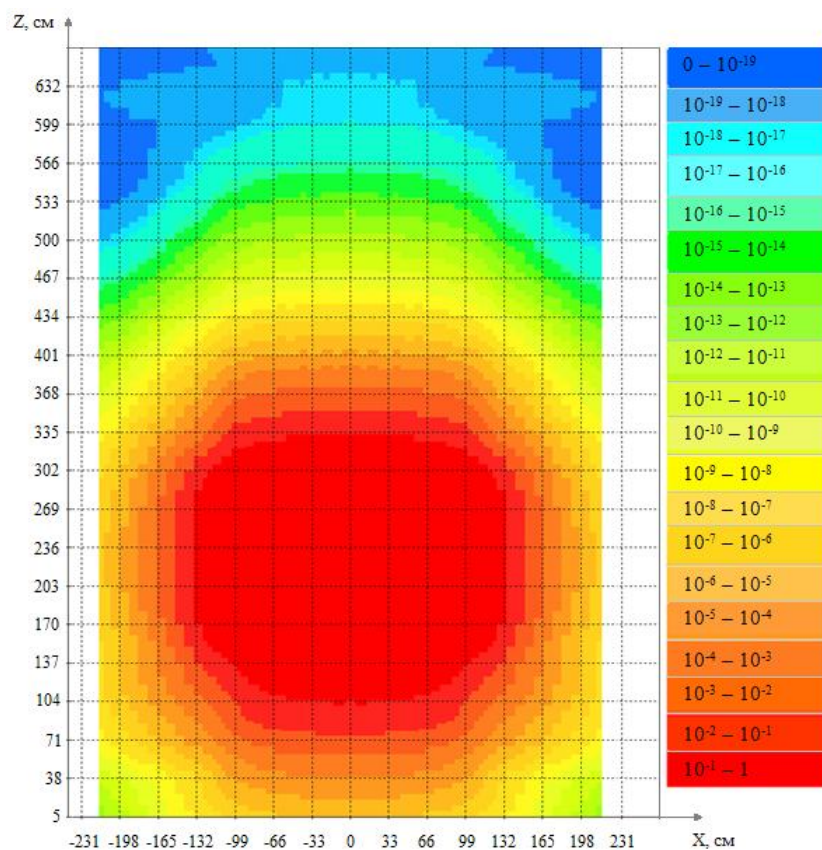


Рисунок 7 – Распределение плотности потока нейтронов по всей расчетной области (вертикальное сечение)

Плотность потока нейтронов от активной зоны до датчиков уменьшается примерно в 10^{17} раз. В районе высоты защитной пробки ~ 600 см ослабление плотности потока нейтронов изменяется с экспоненциального почти на линейное распределение. Это обусловлено наличием газовой полости, которая является местом размещения датчиков.

Приведенная на рисунке 5 расчетная модель с детальным описанием активной зоны реактора и биологической защитой, которая включает множество каналов и трубопроводов была частично гомогенизирована для расчетов, как по проектно-ориентированному гибриднему методу, так и по прямому методу с ручным понижением дисперсии. Верхняя часть защитной пробки моделировалась гомогенным составом, поскольку в расчетах с ручным подбором весовых окон наличие трубопроводов и каналов значительно усложняет процесс задания ценности частиц в расчетных областях.

Гибридным методом PO-CADIS с использованием детерминистической программы MCCG3D и программы MCNP результат с хорошей статистической погрешностью (дисперсия $<7\%$) достигается за 20 ч счета при использовании 44 ядер. Полученное

свидетельствует о потенциально высокой эффективности применения методики CADIS для задач с кратностью ослабления 10^{17} .

За три месяца расчета с ручным понижением дисперсии удалось получить статическую погрешность $\sim 20\%$. Это означает, что отклонение расчетного значения от фактического может составлять несколько крат. Для того, чтобы снизить статистическую погрешность вдвое до 10% потребовалось бы увеличить время расчетов вчетверо до 12 месяцев, что представляется нецелесообразным. Результаты расчетов прямого и гибридного методов показаны на рисунке 8.

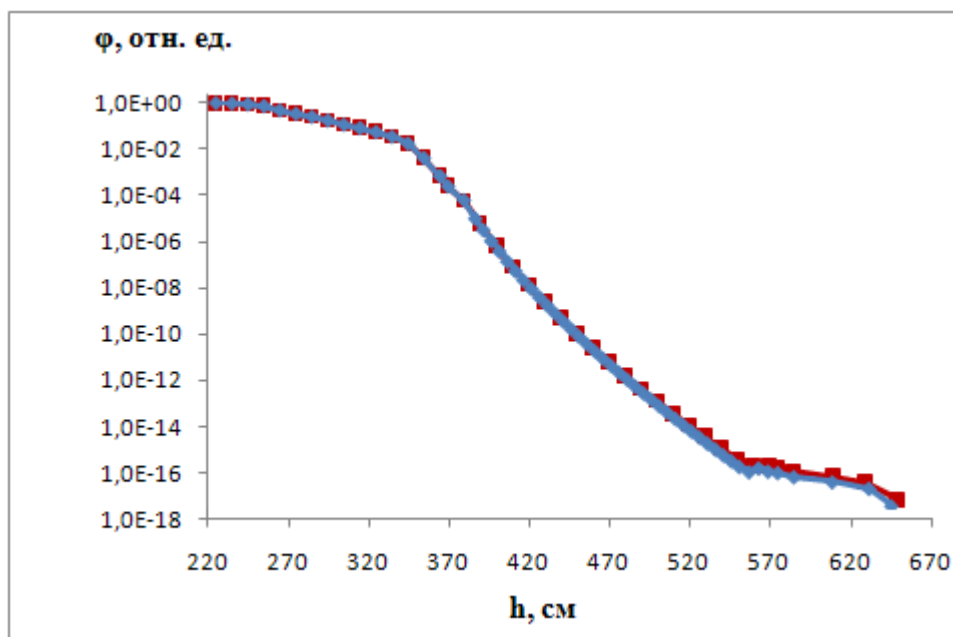


Рисунок 8 – Плотность потока нейтронов в защитной пробке.

- расчет защиты по проектно-ориентированному гибриднему методу с автоматическим использованием весового окна ($\sigma=7\%$);
- ◆— расчет защиты с подбором ценностей нейтронов вручную ($\sigma=20\%$).

Для ручного и автоматического методов отличие между расчетными значениями плотности потока нейтронов в области защитной пробки реактора составила около 2 раз. С учетом величины статистической погрешности ручного расчета, полученные результаты по ручному и гибриднему PO-CADIS методам показывают хорошее согласие между собой.

По гибриднему методу PO-CADIS с использованием детерминистической программы MCCG3D и программы метода Монте-Карло MCNP результат с хорошей

статистической точностью (дисперсия $<7\%$) достигается за 20 часов счета при использовании 44 ядер.

В качестве одного из способов повышения эффективности проводимых вычислений был рассмотрен гибридный метод PO-CADIS, включающий в себя дополнительную методику расчета, с применением техники смещения источника по пространству и энергии. Показан пример расчета тестовой модели радиационной защиты быстрого энергетического реактора по гибридной методике с использованием данной техники.

Тестовая модель «Радиальная защита быстрого реактора» представляет собой прототип радиальной активационной защиты реактора БН-600, PHENIX, PFR. Она является обобщенной моделью защиты БР, отображающая характерные особенности реакторов данного типа. При проведении расчетов с целью обоснования выбора сетки весовых окон, параметров смещения источника по пространству и энергии геометрия модели была выбрана одномерной цилиндрической, поделенной на отдельные зоны. Модель защиты быстрого энергетического реактора выполнена в виде интегральной схемы компоновки активной зоны и оборудования первого контура. Она включает в себя активную зону, теплоноситель и защиту. Активная зона в свою очередь раздроблена на области с различным обогащением.

На рисунке 9 представлена расчетная модель тестовой задачи быстрого энергетического реактора.

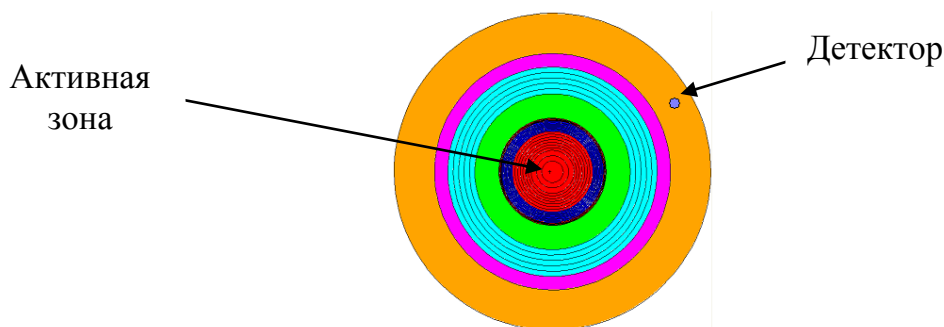


Рисунок 9 – Тестовая модель «Радиальная защита быстрого реактора».

В таблице 2 приведены результаты прямого расчета, прямого расчета с применением техники смещения источника, гибридного метода PO-CADIS и гибридного метода PO-CADIS с использованием техники смещения источника.

Таблица 2. Результаты тестовых расчетов.

<i>Параметр</i>	<i>Прямой расчет MCNP</i>	<i>Прямой расчет со смещенным источником</i>	<i>Расчет по гибричному методу PO-CADIS</i>	<i>Расчет по гибричному методу PO-CADIS со смещением источника</i>
Расчетное значение	5.96E-14	1.041E-13	9.80E-14	1.02E-13
Оценка отн. погрешности, %	99.0	12.7	2.20	1.90
Число историй	1E+8	1E+8	1E+6	1E+6
FOM	1.3E-3	5.8E-2	12.0E+0	17.0E+0
Время, мин.	20.47	26.43	8.08	8.00

Результаты, представленные в таблице 2, показывают высокую эффективность использования техники смещения источника по пространству и энергии. Получено, что для расчета по гибричному методу PO-CADIS со смещенным источником по пространству и энергии критерий статистической эффективности увеличивается на 41 %, по сравнению с расчетом по гибричному методу PO-CADIS без смещения.

Рассмотрим результат расчета прямого моделирования. За время счета равное 20.47 минут при использовании 44 ядер мы получили: относительная погрешность – 99 %, число историй – 1E+8. Отношение между числом историй, начальной относительной погрешностью и погрешностью, которую мы хотим получить запишем в виде:

$$N_T = \left(\frac{RE_I \sqrt{N_I}}{RE_T} \right)^2 \quad (1)$$

где

N_T – конечное число историй;

N_I – начальное число историй;

RE_I – начальная относительная погрешность;

RE_T – конечная относительная погрешность.

Из выражения (1) следует, что по прямому расчету для получения погрешности равной 2%, необходимо затратить 836 часов или 35 дней.

Вопрос о выборе шага геометрической сетки весовых окон недостаточно исследован. Перечислим основные свойства, которые должны быть учтены при выборе узлов сетки весовых окон (WW-сетка) для многогрупповой задачи:

- для устойчивости алгоритма отношение ценностей в соседних ячейках должно быть не более четырех, следовательно, шаг WW-сетки должен быть малым;
- чем меньше шаг WW-сетки, тем поверхностей, на которых происходит расщепление больше. Это приводит к увеличению расчетного времени и уменьшению эффективности, следовательно, шаг WW-сетки должен быть большим;
- важно иметь гладкое решение без осцилляций, которое напрямую зависит от шага между узлами WW-сетки.

Совокупность разнонаправленных свойств WW-сетки означает необходимость поиска оптимального шага. Для сложных задач выбор оптимальной сетки трудоемкий, поэтому необходимо иметь алгоритм автоматического построения. Автоматически шаг пространственной сетки может быть получен следующим образом:

- по детерминистической программе рассчитывается многогрупповая ценность нейтронов с шагом, определяемым из соображений точности;
- для каждой энергетической группы определяется оптимальный шаг WW-сетки из условия соотношения весов в соседних ячейках WW-сетки;
- общая для всех групп WW-сетка строится так, чтобы основные свойства выполнялись для всех групп (и типов частиц).

Основные результаты и выводы

1. В диссертации выполнен обзор существующих расчетных методов и кодов, используемых при решении задач прохождения ионизирующего излучения сквозь защитные композиции ядерных энергетических установок, в основе которых содержатся принципы автоматического понижения дисперсии.

Настоящая диссертация посвящена анализу автоматизированных методов понижения дисперсии в методе Монте-Карло, интенсивно развиваемых в последние годы, и разработке собственного программного средства реализующего эти методы.

В данной работе в качестве пути повышения эффективности расчетов полей нейтронных и фотонных частиц за биологической защитой исследуемой ЯЭУ используется гибридная методика вычислений. В ее основе заложена расчетная схема

MCCG3D+MXWWG+MCNP. Программа MCCG3D используется в расчетной цепочке для решения сопряженной задачи так, как реализованный в ней метод длинных характеристик обладает нулевой численной дисперсией и является единственным методом, гарантирующим сходимость результатов к точному решению.

2. Выполнены кросс-верификационные расчеты по программе MCCG3D и гибриднему методу PO-CADIS, показавшие свою высокую эффективность в сравнении с референтным решением по методу Монте-Карло. Представлены расчеты международной математической задачи («тест Кобаяши») по прохождению через защиту с каналами непосредственно по программе MCCG3D и при использовании программы MCCG3D как генератора весовых окон для программы MCNP. Показана эффективность расчетной схемы.

3. Представлены этапы проведения расчета, а также выбора и обоснования биологической защиты ЯЭУ на основе использования гибридного расчетного метода PO-CADIS. Показана возможность расчета дозовых функционалов за биологической защитой с ослаблением 10-11 порядков со статистической погрешностью 5-10 %.

4. С помощью гибридного метода PO-CADIS выполнен нейтронно-физический расчет радиационной защиты ЯЭУ транспортного назначения. Показана эффективность разработанной методики расчёта биологической защиты.

5. Предложена и обоснована расчетами профилированная биологическая защита ЯЭУ транспортного назначения, отвечающая требованиям нормативных документов по радиационной безопасности.

6. В диссертации показан нейтронно-физический расчет радиационной защиты реактора моноблочного типа, охлаждаемый эвтектическим сплавом свинец-висмут гибридным методом. Получено что ослабление нейтронного потока на поверхности защиты составляет 17 порядков от центра активной зоны реактора. Статистическая погрешность расчетов составила 5-7 %, в то время как погрешность расчета с ручным подбором весовых окон составила 20%.

7. Представлен алгоритм выбора узлов сетки весовых окон для многогрупповой задачи.

8. Написана программа пост-обработки полученных результатов Meshtal2MX.

9. Выполнены расчеты бенчмарка одномерной модели защиты быстрого энергетического реактора по гибриднему методу с применением техники смещения источника по пространству и энергии. Показана эффективность расчетной схемы. С

использованием данного метода критерий статистической эффективности расчета (FOM) повысился на 41 %, по сравнению с гибридным методом PO-CADIS без использования техники смещения источника по пространству и энергии.

Основные публикации по теме диссертации

1. И.Р. Суслов, И.А. Лямцев, С.В. Чернов. Гибридный метод расчета защиты ЯЭУ на основе схемы уменьшения дисперсии CADIS. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – Обнинск 2013. – №2. – С. 71-79.

2. И.Р. Суслов, И.А. Лямцев. Комбинированный метод расчета защиты ЯЭУ. // Атомная энергия. – Москва 2018. – Том 125. – Выпуск 2. – С. 74-78.

3. Е.А. Земсков, И.А. Лямцев, И.Р. Суслов, К.Г. Мельников, И.В. Тормышев, Гибридный нейтронно-физический расчет радиационной защиты ядерного реактора с ТЖМТ. // Атомная энергия. – Москва 2019. – Том 126. – Выпуск 1. – С. 11-15.

4. И.Р. Суслов, С.В. Чернов, И.А. Лямцев. Понижение дисперсии в MCNP с помощью весовых окон, рассчитанных по методу характеристик UXM. // Сборник докладов ежегодного межведомственного XXIII семинара «Нейтронно-физические проблемы атомной энергии», Обнинск, 30 октября – 2 ноября 2012 г., с. 235.

5. И.Р. Суслов, И.А. Лямцев. Выбор сетки весовых окон для расчета защиты. // Сборник тезисов докладов 10-ой Юбилейной Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях». Москва – Обнинск, 22 – 25 сентября 2015 г., с. 33.

6. И.А. Лямцев, И.Р. Суслов. Гибридный метод расчета защиты ЯЭУ. // Сборник докладов конференции молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике». Москва, 23 – 24 мая 2017 г., с. 42.

7. И.Р. Суслов, И.А. Лямцев. Гибридный метод расчета защиты ЯЭУ. Препринт АО ГНЦ РФ-ФЭИ-3267, 2016.

8. И.Р. Суслов, И.А. Лямцев, Е.А. Земсков. Базовая тестовая модель расчета защиты ЯЭУ с ТЖМТ. Препринт АО ГНЦ РФ-ФЭИ-3277, 2017.

9. И.Р. Суслов, Е.В. Девкина, И.А. Лямцев, В.А. Чернов. Двухмерная тестовая модель защиты ТУК для отработавшего ядерного топлива. Препринт АО ГНЦ РФ-ФЭИ-3278, 2017.